



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN, ESPECIALIDAD EN
SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

***“DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA OBTENCIÓN DE
PARÁMETROS ACÚSTICOS DERIVADOS DE LA RESPUESTA AL
IMPULSO EN ACÚSTICA DE SALAS”***

Eider Román Eceiza

Tutor: Dr. Ricardo San Martín Murugarren

Pamplona, Junio 2010



ÍNDICE

ÍNDICE

• OBJETIVO.....	7
• RESUMEN.....	7
1. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE RECINTOS.....	8
1.1. Respuesta al impulso.....	9
1.2. Señales de excitación.....	11
1.2.1. Señales pseudoimpulsivas.....	11
1.2.2. Señales aleatorias.....	11
1.2.3. Señales pseudoaleatorias.....	12
1.2.4. Barridos frecuenciales.....	12
1.2.4.1. Sweeps lineales.....	13
1.2.4.2. Sweeps logarítmicos.....	14
1.2.4.3. Sweeps optimizados.....	14
1.3. Parámetros derivados de la respuesta impulsiva.....	15
1.3.1. Fuerza acústica o sonoridad.....	16
1.3.2. Mediciones del tiempo de caída inicial.....	17
1.3.2.1. EDT.....	17
1.3.2.2. Tiempo de reverberación.....	17
1.3.3. Balance entre energía inicial y final.....	17
1.3.3.1. Claridad de la voz, C_{50}	18
1.3.3.2. Claridad musical, C_{80}	18
1.3.3.3. Definición, D_{50}	18
1.3.3.4. Centro de gravedad o tiempo central, T_s	19
1.3.4. Parámetros relacionados con la energía lateral inicial.....	19
1.3.4.1. Eficiencia lateral o fracción de energía, LF	19
1.3.4.2. LFC	20
1.3.5. Parámetros binaurales derivados de la respuesta impulsiva.....	20
1.3.5.1. $IACC$	20
2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	20
2.1. Introducción.....	21
2.2. Elaboración del software.....	21

3. MÉTODO OPERATIVO.....	22
3.1. Introducción.....	23
3.2. Descripción de los métodos.....	23
3.3. Esquema general.....	23
3.4. Rutinas.....	26
3.4.1. Introducción.....	26
3.4.2. Filtrado por bandas de octava de la respuesta impulsiva.....	26
3.4.3. Localización del punto de inicio.....	27
3.4.4. Punto de truncamiento de cada banda de octava.....	28
3.4.5. Truncamiento de cada banda de octava.....	32
3.4.6. Curva de decaimiento energético y determinación de los tiempos de reverberación de cada banda de octava.....	32
3.4.7. Energía de compensación.....	34
3.4.8. Determinación de los parámetros acústicos de cada banda.....	36
3.4.9. Determinación de los parámetros laterales y binaurales de cada banda de octava.....	37
4. RESULTADOS.....	40
4.1. Método 1.....	41
4.1.1. Introducción.....	41
4.1.2. Captura de la respuesta impulsiva.....	41
4.1.3. Punto de inicio de la respuesta impulsiva en banda ancha.....	42
4.1.4. Enventanado de la respuesta impulsiva en banda ancha.....	42
4.1.5. Filtrado por bandas de octava.....	43
4.1.6. Punto de truncamiento de cada banda de octava.....	43
4.1.7. Curva de decaimiento energético.....	51
4.1.8. Energía de compensación.....	51
4.1.9. Curva de decaimiento energético considerando la energía de compensación.....	52
4.1.10. Relación señal ruido.....	56
4.1.11. Determinación de los tiempos de reverberación de cada banda de octava.....	56
4.1.12. Determinación de los parámetros acústicos de cada banda de octava.....	57
4.1.13. Determinación de los parámetros laterales y binaurales de cada banda de octava.....	57

4.2. Método 2.....	58
4.2.1. Introducción.....	58
4.2.2. Captura de la respuesta impulsiva.....	58
4.2.3. Filtrado por bandas de octava.....	58
4.2.4. Punto de inicio de cada banda de octava.....	60
4.2.5. Punto de truncamiento de cada banda de octava.....	62
4.2.6. Curva de decaimiento energético.....	64
4.2.7. Curva de decaimiento energético considerando la energía de compensación.....	64
4.2.8. Relación señal ruido.....	65
4.2.9. Determinación de los tiempos de reverberación de cada banda de octava.....	65
4.2.10. Determinación de los parámetros acústicos de cada banda de octava.....	66
4.2.11. Determinación de los parámetros laterales y binaurales de cada banda de octava.....	66
4.3. Comparativa de los métodos con el WinMLS.....	66
4.4. Análisis genérico con más señales.....	65
4.4.1. Número de JNDs.....	74
5. INTERFAZ GRÁFICA.....	77
5.1. Introducción.....	78
5.2. Proceso de elaboración.....	78
5.3. Explicación ventanas para usuario.....	78
5.3.1. Portada.....	78
5.3.2. Primera página.....	79
5.3.3. Elección Método 1.....	80
5.3.3.1. Captura de la respuesta impulsiva.....	80
5.3.3.2. Punto de inicio de la respuesta impulsiva en banda ancha.....	80
5.3.3.3. Proceso de truncamiento.....	81
5.3.3.4. Curva de decaimiento energético.....	83
5.3.3.5. Cálculos.....	85
5.3.4. Elección Método 2.....	86
5.3.4.1. Filtrado de la respuesta impulsiva en bandas de octava.....	87
5.3.4.2. Punto de inicio de cada banda de octava.....	88
5.3.5. Página despedida.....	89



6. VALORACIÓN DEL SOFTWARE.....	90
7. PROPUESTA DE MEJORA.....	93
8. CONCLUSIONES.....	95
• BIBLIOGRAFÍA.....	97
• ANEXOS.....	99
ANEXO A. Filtro Butterworth.....	100
ANEXO B. Proceso de truncamiento.....	104
ANEXO C. Energía de compensación.....	120
ANEXO D. Análisis genérico del software.....	122
ANEXO E. Definición del JND y sus valores.....	181

OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es la implementación de un software capaz de obtener la respuesta al impulso en acústica de salas y los parámetros acústicos que derivan de ella.

El primer propósito a cumplir es la implementación de barridos frecuenciales (sweeps), suficientemente favorables para conseguir una relación señal ruido óptima de la respuesta al impulso, que se mantenga constante en las distintas bandas de frecuencia, asisto es necesario, sobre todo, de cara a respuestas impulsivas destinadas a ser usadas en auralizaciones.

Lo citado en el párrafo anterior fue realizado por Lander Egia para su proyecto final de carrera. Por ello, el principal propósito del presente proyecto es la integración del cálculo de los parámetros a esta primera parte. De esta forma se podrá llevar a cabo una valoración de la calidad acústica de cualquier sala o recinto.

RESUMEN

La principal finalidad del presente proyecto ha sido la elaboración de un software, lo suficientemente preciso para la obtención de los parámetros acústicos que derivan de la respuesta impulsiva. Éste será útil para análisis acústicos que se vayan a realizar en cualquier recinto. Ha sido empleado el lenguaje de programación *MatLab*, con el cual se han programado los algoritmos necesarios para la obtención del software.

Primero se debe obtener una correcta respuesta al impulso, para lo cual es indispensable una excitación apropiada del recinto a analizar. Para ello, en la primera parte de este trabajo se ha llevado a cabo la síntesis de barridos frecuenciales optimizados para conseguir unos resultados satisfactorios. Estos se basan en una excitación de la sala de acuerdo con el ruido de fondo presente. El algoritmo para la síntesis de los sweeps tiene en cuenta el ruido de fondo, por lo que la frecuencia que se emite en cada momento está compensando el ruido en esa misma frecuencia.

Una vez elaborado el barrido frecuencial, éste se emite como excitación de la sala. De este modo se recibe su respuesta y se puede calcular la respuesta impulsiva y la función de transferencia.

Tras la implementación de esta primera parte, continúa el objetivo del presente proyecto. Se ha desarrollado un algoritmo computacional capaz de calcular todos los parámetros derivados de la respuesta impulsiva, teniendo en cuenta todos los criterios exigidos por la norma *ISO 3382-2010*. Éstos se citarán a lo largo de la presente memoria.



CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE RECINTOS

1. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE RECINTOS

Para caracterizar acústicamente un recinto o sala, es necesario conocer su respuesta al impulso, para así obtener sus propiedades acústicas. Para ello es indispensable utilizar una señal de excitación con una **relación señal ruido** lo suficientemente elevada para obtener una inmunidad mayor frente al ruido. De ahí surgen los barridos frecuenciales o sweeps.

1.1. Respuesta al impulso

Para definir la respuesta al impulso en el dominio del tiempo es necesario considerar un **sistema lineal e invariante temporal (LTI)**.

Este sistema está caracterizado por su invarianza con el tiempo, lo cual significa que un retraso o adelanto de tiempo de la señal de entrada, provoca un desplazamiento idéntico en la señal de salida. Por otro lado, si el sistema es lineal, significa que se satisface el principio de superposición, es decir, la respuesta de un sistema lineal a una suma ponderada de señales de entrada, es igual a la misma suma ponderada de las señales de salida.

Una vez definido el sistema, si analizamos la señal de entrada, debemos considerar la **función de impulso**.

En el dominio del tiempo un pulso unitario se define a partir del siguiente par de relaciones:

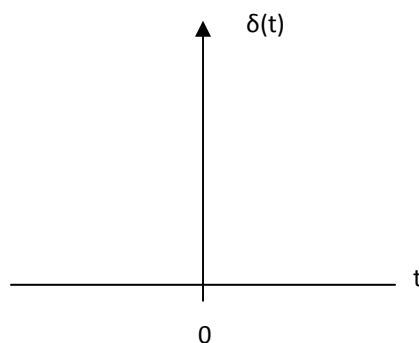
$$\delta(t) = 0 \text{ para } t \neq 0$$

Esto indica que el impulso $\delta(t)$ es cero en todos lados salvo en el origen

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

Y el área total bajo el impulso unitario es la unidad, lo que significa que en todo su espectro vale 1.

El impulso $\delta(t)$ también se conoce como la función **delta de Dirac** y su descripción grafica es la siguiente:



Definidos estos conceptos, la respuesta al impulso es la salida de un sistema LTI debido a una entrada impulso aplicada en el tiempo $t=0$. La respuesta al impulso caracteriza por completo el comportamiento de cualquier sistema LTI.

Conociendo la definición de un sistema LTI y teniendo como entrada un pulso unitario, la salida de un sistema LTI está dada por una superposición ponderada de respuestas al impulso en el tiempo. Esta superposición ponderada recibe el nombre de **integral de convolución** en sistemas en tiempo continuo.

Analicemos lo anterior de forma matemática. Para saber como responde un determinado sistema lineal $h(t)$ a una señal de entrada $x(t)$, basta con aplicar una operación convolución.

$$x(t) * h(t) = y(t)$$

Donde

* representa la operación de convolución.
 $x(t)$ es la señal de entrada.
 $h(t)$ es la respuesta al impulso del sistema.
 $y(t)$ es la señal de salida.

Para hacer un análisis en el dominio frecuencial debemos realizar una **transformada de Fourier**. En este dominio la convolución se traduce en una multiplicación, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$X(f) \cdot H(f) = Y(f)$$

Donde

$X(f)$ es la señal de entrada.
 $H(f)$ es la respuesta al impulso en el dominio frecuencial, también denominada función de transferencia.
 $Y(f)$ es la señal de salida.

Hasta aquí, si a nuestro sistema LTI le aplicamos como señal de entrada una delta de Dirac, podemos definir la siguiente ecuación:

$$\delta(t) * h(t) = h(t)$$

Donde

* representa la operación de convolución
 $\delta(t)$ es la función delta de Dirac
 $h(t)$ es la respuesta al impulso del sistema

Sabiendo que la transformada de Fourier de un pulso unitario es 1, en el dominio frecuencia la ecuación anterior se transforma en:

$$1 \cdot H(f) = H(f)$$

Donde

$H(f)$ es la respuesta al impulso del sistema

Dentro de la acústica arquitectónica la combinación de altavoz (emisor, genera la señal de entrada o excitación) y micrófono (receptor, recoge la señal de salida), se puede considerar como un sistema de transmisión acústica, donde la respuesta describe los cambios sufridos por la señal acústica de entrada.

1.2. Señales de excitación

A continuación, estudiaremos las posibles señales de excitación que disponemos para aplicar todo lo anterior al campo de la acústica arquitectónica y así poder realizar valoraciones acústicas de determinados recintos.

Simular un impulso unitario no es tarea fácil. Existen altavoces los cuales son incapaces de reproducir señales impulsivas de forma correcta. La necesidad de concentrar en un intervalo corto de tiempo la suficiente energía de excitación para obtener una relación señal ruido suficientemente alta, puede provocar que el altavoz abandone su rango lineal de operación y quede dañado.

Asimismo, para un análisis acústico, es suficiente con considerar el espectro audible de un ser humano, el cual va desde los 20 Hz hasta los 20 KHz. Esto conlleva que será suficiente que la señal de excitación sea impulsiva en este rango de frecuencias. Así, consideramos una señal de entrada la cual su espectro sea 1 en este rango frecuencial, esto facilita el trabajo.

A continuación se describe un resumen de las posibles señales de excitación que disponemos.

1.2.1. Señales pseudoimpulsivas

Se generan a partir de disparos de pistola, explosiones de globos o petardos. Mediante este tipo de señales no podemos obtener una relación señal ruido con un nivel adecuado, ya que es bastante difícil obtener una distribución energética en todo el espectro audible y que el ruido de fondo sea superado. Otro problema que presentan es la falta de repetitividad, las distintas excitaciones difieren mucho entre sí.

1.2.2. Señales aleatorias

Este tipo de señales tienen una densidad espectral constante, algo deseable en casi todas las mediciones acústicas, lo que las hace útiles para la obtención de respuestas impulsivas.

Sin embargo, a diferencia de las señales pseudoimpulsivas, debemos definir las correlaciones existentes. Matemáticamente, la correlación cruzada de una señal de entrada y otra de salida es igual a la autocorrelación de la señal de entrada convolucionada con la respuesta impulsiva del sistema:

$$\phi_{xy}(t) = h(t) * \phi_{xx}(t)$$

Donde

* representa la operación de convolución.

ϕ_{xy} es la correlación cruzada entre la señal de entrada y la señal de salida.

$h(t)$ es la respuesta del sistema.

$\phi_{xx}(t)$ es la autocorrelación cruzada de la señal de entrada.

Como señal de entrada consideramos una señal con densidad espectral constante, o lo que es lo mismo, con espectro blanco. Su autocorrelación se asemeja a un impulso:

$$\phi_{xx} = h(t) * \delta(t) = h(t)$$

Donde

* representa la operación de convolución.

ϕ_{xy} es la correlación cruzada entre la señal de entrada y la señal de salida.

$h(t)$ es la respuesta del sistema.

$\delta(t)$ es la función delta de Dirac.

Por lo tanto, para hallar la respuesta del sistema, basta con obtener la correlación cruzada entre la señal de entrada y salida.

De igual manera que en el caso anterior, estas señales no son lo suficientemente repetitivas, lo cual provocará una falta de fiabilidad en los resultados.

1.2.3. Señales pseudoaleatorias

Para solucionar los problemas anteriores surgen las señales pseudoaleatorias. Este tipo de señales son deterministas, poseen un contenido frecuencial y de nivel relativamente constante en un largo periodo de tiempo.

Dentro de este tipo de señales, encontramos las señales **MLS (Maximum length sequences)**. Son secuencias binarias y pueden ser generadas con un *N-stage shift register* y una compuerta XOR (con hasta cuatro entradas) conectada con un *shift register* (alternador de registro). Así, conseguimos una buena simulación de ruido aleatorio, con la ventaja de que en todo momento conocemos la señal con la que estamos tratando.

Dentro de sus propiedades encontramos que su correlación es muy similar a la delta de Dirac, por lo que las hace adecuadas para mediciones de funciones de transferencia.

El problema que presentan es su alta vulnerabilidad a la distorsión y la varianza temporal.

1.2.4. Barridos frecuenciales

Por último disponemos de los barridos frecuenciales o sweeps. Estas señales son señales deterministas por lo que con ellas se obtiene una mejor relación señal ruido y se consigue que la vulnerabilidad frente a la varianza del tiempo sea menor. Los resultados obtenidos serán más precisos que en el caso de las señales anteriores. Utilizando sweeps que sean considerablemente mayores que la respuesta al impulso, aumenta la relación señal ruido y disminuye la influencia de la variación frente al tiempo.

Este tipo de señales se basan en una frecuencia pura creciente en el tiempo, de este modo, se excita toda la zona espectral de interés por medio del tono de excitación en ese instante. Se puede definir como una delta de Dirac extendida en el tiempo.

Los sweeps pueden ser creados directamente en el dominio del tiempo o indirectamente en el dominio de la frecuencia. En este último caso, su magnitud y retardo de grupo son sintetizados y el sweep es obtenido mediante la antitransformada de Fourier.

Para sintetizar el retardo de grupo $\tau(f)$, se debe definir la fase de la señal, esto indica en que momento del tiempo llega cada componente frecuencial. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$\tau(f) = -\frac{\partial \phi}{\partial f}$$

Donde

$\frac{\partial \phi}{\partial f}$ es la derivada de la fase respecto de la frecuencia.

La frecuencia instantánea $f_i(t)$, también será de utilidad para saber la relación entre el tiempo y la frecuencia de la señal, pero en este caso, este parámetro nos indica con que

frecuencia se está excitando en cada instante de tiempo. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$f_i(t) = \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

Donde

$\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ es la derivada de la fase respecto del tiempo.

A continuación veremos los posible sweeps que existen.

1.2.4.1. Sweeps lineales

Este tipo de sweeps tienen un espectro blanco y aumentan con una razón fija por unidad de tiempo:

$$\frac{f_2 - f_1}{T_2 - T_1} = \text{const}$$

Donde

f_1 y f_2 representan la frecuencia inicial y final respectivamente.

T_1 y T_2 representan el tiempo inicial y final respectivamente.

En el dominio del tiempo para sintetizar un sweep lineal, basta con crear una señal senoide cuya fase se vaya incrementando respecto al tiempo. De esta forma se pueden definir la frecuencia instantánea y la fase.

$$f_i(t) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = \frac{1}{2\pi} \cdot t + f_1 = \frac{(f_2 - f_1)}{T} \cdot t + f_1$$

Donde

$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)$ es la derivada de la fase respecto al tiempo.

t es el vector de tiempos.

f_1 y f_2 son la frecuencia inicial y final respectivamente.

T es la duración completa de la señal.

Y sabiendo que la fase se obtiene integrando la frecuencia instantánea, la fase para sintetizar un sweep lineal es:

$$\varphi(t) = 2\pi \int f_i(t) dt = 2\pi \left[f_1 \cdot t + \frac{(f_2 - f_1)}{T} \cdot \frac{t^2}{2} \right]$$

Donde

$f_i(t)$ es la frecuencia instantánea.

t es el vector de tiempos.

f_1 y f_2 son la frecuencia inicial y final respectivamente.

T es la duración completa de la señal.

1.2.4.2. Sweeps logarítmicos

Este tipo de sweeps tienen un espectro rosado, lo que significa que la amplitud disminuye 3 dB/oct., es decir, todas las octavas contienen la misma energía. Para este tipo de sweeps la frecuencia aumenta con una fracción fija de una octava por unidad de tiempo:

$$\frac{\log(f_2/f_1)}{T_2 - T_1} = \text{const}$$

f_1 y f_2 representan la frecuencia inicial y final respectivamente.
 T_1 y T_2 representan el tiempo inicial y final respectivamente.

Como en el caso del sweep lineal, para sintetizar un sweep logarítmico en el dominio del tiempo, se debe crear una señal sinusoidal, la cual tenga una fase creciente con el tiempo, pero en este caso el crecimiento es logarítmico. Para conseguir esta fase, lo primero es definir la frecuencia instantánea, la cual en este caso se describe de la siguiente manera:

$$\log(f_i(t)) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right) = \frac{1}{2\pi} \cdot t + \log(f_1) = \frac{\log(f_2/f_1)}{T} \cdot t + \log f_1$$

Donde

$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)$ es la derivada de la fase respecto al tiempo.

t es el vector de tiempos.

f_1 y f_2 son la frecuencia inicial y final respectivamente.

T es la duración completa de la señal.

Y para poder despejar:

$$f_i(t) = e^{\frac{1}{2\pi}t + \log(f_1)} = e^{\frac{1}{2\pi}t} \cdot e^{\log(f_1)} = e^{\frac{1}{2\pi}t} f_1$$

Y para conseguir la fase, basta con integrar la expresión anterior:

$$\varphi(t) = 2\pi \int f_i(t) dt = 2\pi \cdot f_1 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot e^{\frac{1}{2\pi}t}$$

Donde

$f_i(t)$ es la frecuencia instantánea.

t es el vector de tiempos.

f_1 es la frecuencia inicial.

1.2.4.3. Sweeps optimizados

Llegados a este punto y valorando cada señal de excitación presentadas, se debe hacer la comparativa para asegurar una señal de entrada lo suficientemente fiable, para conseguir unos resultados satisfactorios.

Los sweeps logarítmicos se crearon para superar la carencia que presentaban los sweep lineales frente al ruido. Estos últimos, no consiguen superar el ruido de fondo presente en un recinto. El espectro blanco que presentan no es suficiente para superar este nivel. Sin

embargo, el sweep logarítmico, por su característica de crecimiento frecuencial logarítmico, es menos inmune al ruido y excitan durante más tiempo las bajas frecuencias. Esto conlleva una relación señal ruido mayor, ya que en las bajas frecuencias es donde el ruido de fondo predomina.

Con el fin de crear un barrido frecuencial de características óptimas, aparecen los sweeps optimizados o arbitrarios. Estos excitan la sala de acuerdo con el ruido de fondo presente, es decir, la frecuencia que se emite en cierto momento está compensando el ruido de fondo en esa misma frecuencia. Por ello, la relación señal ruido es constante en toda la banda de análisis.

Para sintetizar este tipo de barridos, se puede optar por distribuir en el tiempo el barrido frecuencial para que aquellas componentes frecuenciales que necesiten más énfasis sean excitadas durante más tiempo. Para ello basta con definir un retardo de grupo que se base en el ruido de fondo presente en la sala objeto de estudio.

El módulo del espectro se define a partir de la magnitud del ruido de fondo, la señal de excitación deberá tener el mismo espectro en magnitud que este último. Ahora solo queda definir el retardo de grupo, es decir, la distribución frecuencial a lo largo del tiempo.

Según Swen Müller, el retardo de grupo asociado al ruido de fondo se consigue mediante la siguiente operación:

$$\tau_G(f) = \tau_G(f - df) + C \cdot |H(f)|^2$$

Donde

$\tau_G(f)$ es el retardo de grupo asociada a la frecuencia f .
 $|H(f)|$ es la magnitud del espectro del ruido de fondo.
 C es un factor corrector que se define como:

$$C = \frac{\tau(f_2) - \tau(f_1)}{\sum_{f=0}^{f_s/2} |H(f)|^2}$$

Donde

$\tau(f_2)$ es el retardo de grupo de la frecuencia final o la duración.
 $\tau(f_1)$ es el retardo de grupo de la frecuencia inicial o momento de comienzo.
 $|H(f)|$ es la magnitud del espectro del ruido de fondo.

Y por último para conseguir la fase de la señal de excitación, basta con realizar la integral del retardo de grupo respecto a la frecuencia. Y tras esta operación, se realiza una transformada de Fourier inversa para trasladar esta señal al dominio del tiempo. Esta fase será la fase de la señal sinusoide necesaria para sintetizar el sweep optimizado.

1.3. Parámetros derivados de la respuesta impulsiva

Una vez obtenido el sweep deseado, realizando un tratamiento adecuado de la respuesta al impulso y desarrollando los algoritmos apropiados, podremos derivar diferentes parámetros, los cuales serán útiles para hacer un análisis acústico de cualquier recinto.

El parámetro por excelencia, es el **tiempo de reverberación**. Se considera un parámetro indispensable para estimar las propiedades acústicas de una sala. Sin embargo, son necesarias varias medidas para realizar una evaluación completa, tales como los niveles relativos de la presión acústica, las relaciones de energía inicial/final, la fracción de energía lateral, las funciones de correlación cruzada intraurales y los niveles de ruido de fondo. De este

modo se obtendrán los diversos parámetros que son necesarios para lograr una evaluación exhaustiva de una sala.

Haciendo uso del método de la respuesta impulsiva integrada (*ISO 3382:2010*), se podrán obtener los diferentes parámetros acústicos que derivan de esta.

Estos parámetros son útiles para obtener aspectos subjetivos del carácter acústico de un auditorio. Haciendo uso de ciertas magnitudes, obtenidas a partir de la respuesta al impulso, se logrará una descripción más detallada del carácter acústico de la sala.

Tomando como referencia la norma *ISO 3382:2010*, ésta divide las magnitudes en cuatro grupos diferentes. En varios de estos grupos encontramos más de un parámetro, sin embargo, los valores de las distintas magnitudes de cada grupo están muy correlacionadas entre si, por lo que no haría falta realizar el cálculo de todos los parámetros del conjunto, aunque por lo menos sí uno de ellos.

1.3.1. Fuerza acústica o sonoridad

Hace referencia al grado de amplificación producido por la sala. Su valor depende de la distancia entre el oyente y la fuente, de la energía asociada a las primeras reflexiones, del grado de ocupación y del nivel del campo reverberante.

Para la medición de este parámetro se hace uso de una fuente omnidireccional calibrada y según Lehmann, se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por la fuente en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 metros.

La fórmula matemática se presenta a continuación, la cual muestra el cociente logarítmico entre la exposición a la presión acústica (la integral del cuadrado de la presión acústica en el tiempo) de la respuesta impulsiva medida y la respuesta medida a una distancia de 10 metros de la misma fuente en un campo libre (Norma *ISO 3382:2010*).

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10}$$

Donde

$$L_{pE} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] dB \quad (\text{Nivel de exposición acústica de } p(t))$$

y

$$L_{pE,10} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] dB \quad (\text{Nivel de exposición acústica de } p_{10}(t))$$

En las ecuaciones anteriores, $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medida, $p_{10}(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida a una distancia de 10 metros en campo libre, p_0 es 20 μPa y $T_0=1$ s. El valor inicial de las integrales ($t=0$) corresponde con el inicio del sonido directo y el valor final ($t=\infty$) corresponde con un tiempo igual o superior a aquel en el que la curva de caída a descendido al menos 30 dB.

1.3.2. Mediciones del tiempo de caída inicial

En este grupo encontramos 2 parámetros, el tiempo de caída inicial, **EDT (Early Decay Time)** y el **tiempo de reverberación, T**. El cálculo de estos parámetros pueden obtenerse a partir de la curva de caída energética (**Energy Decay Curve (EDC)**), la cual se obtiene mediante una integración invertida en el tiempo de la respuesta cuadrática al impulso (Schroeder):

$$EDC(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau - \int_0^t h^2(\tau) d\tau$$

La determinación de la pendiente para calcular los tiempos de reverberación se realiza mediante la regresión lineal de la curva de caída por mínimos cuadrados. Debido a la imposibilidad, en la mayoría de los casos prácticos, de obtener un rango de caída tan elevado, se evalúa el intervalo comprendido entre 5 dB y los 35 dB por debajo del nivel inicial y se extrapola a una caída de 60 dB (cálculo del T_{30}), o el intervalo comprendido entre 5 dB y los 25 dB por debajo del nivel inicial y nuevamente extrapolando a una caída de 60 dB (cálculo del T_{20}).

1.3.2.1. EDT

Se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que la fuente deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB, por lo que se obtendrá a partir de los primeros 10 dB de caída. El tiempo de caída se calcula a partir de esta pendiente extrapolando a una caída de 60 dB.

1.3.2.2. Tiempo de reverberación

Se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB.

Este parámetro hace referencia al grado de reverberación percibido en la sala y también corresponde con el grado de “viveza” de la sala.

Ambos parámetros varían en función de la frecuencia.

En el caso en que exista una perfecta difusión del sonido producida por una geometría regular de la sala y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos, el decaimiento de la energía sonora seguirá una evolución exponencial, la cual se convertirá en una línea recta al pasar a escala semilogarítmica. En tal caso el valor del EDT y T coincidirán.

Sin embargo, este es un caso ideal, en la práctica, como consecuencia de una falta de difusión perfecta la curva de decaimiento energético puede presentar, en distintos puntos de la sala, una doble pendiente. Por lo que ambos valores diferirán en diferente grado.

El valor del EDT será más fiable que el valor de T a la hora de valorar la impresión subjetiva de viveza de la sala, por lo que estará relacionado con la reverberancia percibida. El valor de T hará referencia a las propiedades acústicas del auditorio.

1.3.3. Balance entre energía inicial y final

En este apartado se consideran las relaciones entre la energía acústica inicial y final. Se puede calcular para 50 ms o para 80 ms dependiendo de si el estudio se realiza en condiciones de palabra o música respectivamente.

$$C_{t_c} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{t_c} p^2(t) dt}{\int_{t_c}^{\infty} p^2(t) dt} \right) dB$$

Donde C_{t_c} es el índice inicial-final y t_c es el límite de tiempo inicial de 50 ms u 80ms.

1.3.3.1. Claridad de la voz, C_{50}

Se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente en los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que llega después de los primeros 50 ms. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 KHz y se expresa en escala logarítmica (dB).

Para un cálculo del valor representativo de C_{50} , llamado “speech average” se considera una media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz y 4 KHz. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25%, respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra.

1.3.3.2. Claridad musical, C_{80}

Se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que llega después de los primeros 80 ms. La elección de este intervalo es debido a que cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo, por ello, contribuyen a aumentar la claridad musical. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4KHz y se expresa en escala logarítmica (dB).

El “music average” se obtiene a partir del valor medio de las bandas de 500 Hz, 1 KHz y 2 KHz.

Este parámetro es un indicativo del grado de separación existente entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

1.3.3.3. Definición, D_{50}

Este parámetro se utiliza para condiciones de discurso y se define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.050s} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Se calcula para cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 KHz.

El valor de D_{50} varía en función de la posición de la fuente respecto a la sala y la situación óptima ocurre cuando está situada frontalmente y empeora a medida que se realiza una rotación del emisor.

La relación entre este parámetro y la claridad de la voz se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) dB$$

O lo que es lo mismo:

$$D_{50} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{C_{50}}{10}}}$$

1.3.3.4. Centro de gravedad o tiempo central, T_s

Este parámetro es aplicable a cualquier tipo de recinto y se define como el tiempo del centro de gravedad de la respuesta impulsiva cuadrática, es decir, el momento de primer orden del área situada bajo la curva de decaimiento energético y se mide en segundos.

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

1.3.4. Parámetros relacionados con la energía lateral inicial

En este apartado se presta atención a la denominada espacialidad o impresión del sonido. En concreto, con la amplitud aparente de la fuente sonora, la cual será significativa de la impresión espacial del sonido. Cuanto mayor sea la impresión espacial de la sala, las valoraciones subjetivas tendrán mejores resultados.

Si el número de primeras reflexiones es elevado, provocará una aparente amplitud de la fuente, ya que el oído humano suma estas reflexiones con el sonido directo, lo que conlleva a que la localización de la fuente sea ambigua.

De ahí la importancia de la energía lateral inicial y de la definición de la eficiencia lateral, relacionada con la energía de primeras reflexiones laterales.

1.3.4.1. Eficiencia lateral o fracción de energía, LF

Se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo.

Se puede medir a través de la respuesta impulsiva obtenida de un micrófono omnidireccional y otro con patrón en forma de ocho. El cero de este último apunta hacia el centro acústico de la posición de la fuente, de esta forma el micrófono responde predominantemente a la energía que llega desde las direcciones laterales y no está influenciado de forma significativa por el sonido directo.

$$LF = \frac{\int_{0.005s}^{0.080s} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0.080s} p^2(t) dt}$$

Donde $p_L^2(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva del auditorio medida con un micrófono con patrón en forma de ocho.

1.3.4.2. LFC

Dado que la directividad del micrófono con patrón en forma de ocho tiene esencialmente forma de coseno y que los valores de precisión están elevados al cuadrado, la fracción de energía lateral obtenida para una reflexión individual varía con el cuadrado del coseno del ángulo de incidencia de la reflexión respecto al eje de sensibilidad máxima del micrófono.

Por esta razón, como alternativa, se utiliza una aproximación con la ecuación anterior, para la obtención de las fracciones de energía lateral, LFC, con contribuciones que varía únicamente con el coseno del ángulo, considerada subjetivamente más precisa.

$$LFC = \frac{\int_{0.005s}^{0.080s} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{0.080s} p^2(t) dt}$$

1.3.5. Parámetros binaurales derivados de la respuesta impulsiva

En este punto, también se valora la importancia de la impresión espacial de una sala de conciertos y se define el parámetro IACC para describir la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos. Es indicativo del grado de similitud existente entre las dos señales.

1.3.5.1. IACC

En la práctica para la medición de este parámetro, al ser un parámetro de medida binaural (doble) se utiliza una cabeza artificial (Dummy head), la cual tiene colocados dos micrófonos a la entrada de los canales auditivos.

La función de la correlación cruzada interaural normalizada; IACF se define como:

$$IACF_{t1,t2}(\tau) = \frac{\int_{t1}^{t2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\left[\int_{t1}^{t2} p_l^2(t) dt \int_{t1}^{t2} p_r^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

Donde $p_l(t)$ es la respuesta impulsiva en la entrada del canal del oído izquierdo y $p_r(t)$ la del oído derecho.

Los coeficientes de correlación cruzada interaural, IACC, vienen dados por:

$$IACC_{t1,t2}(\tau) = \max |IACF_{t1,t2}(\tau)|, \text{ para } -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}$$



DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

2.1. Introducción

En este apartado se describen todos los dispositivos empleados.

La realización de este proyecto ha sido principalmente la elaboración de un algoritmo. Por ello, el dispositivo empleado ha sido únicamente informático. A continuación se presentan los softwares que se han manejado a lo largo de todo el trabajo.

2.2. Elaboración del software

PC: Equipo informático el cual contenga los programas Matlab y WinMLS

Software Matlab: Es una herramienta para realizar cálculos matemáticos. Es un lenguaje de programación amigable al usuario con características más avanzadas y mucho más fácil de utilizar que los lenguajes de computadores tales como Pascal o C. Proporciona un entorno rico para la visualización de datos a través de sus poderosas capacidades gráficas. MATLAB es una plataforma de desarrollo de aplicaciones, donde conjuntos de herramientas para la resolución de problemas en área de aplicación específica, llamadas *toolboxes*, se pueden desarrollar con facilidad relativa.

Software WinMLS: Es una herramienta informática de análisis acústico utilizado extensamente por los profesionales.

Este software de análisis acústico ha sido una de las bases para la elaboración del programa. Los resultados aportados por éste han sido de ayuda a la hora de realizar comparaciones con los resultados conseguidos con el algoritmo implementado.



MÉTODO OPERATIVO

3. MÉTODO OPERATIVO

3.1. Introducción

Se ha llevado a cabo la implementación de dos métodos diferentes. Se han analizado las disimilitudes entre ambos criterios, con lo que se localizan resultados interesantes por discutir. Los llamaremos *Método 1* (el filtrado por bandas de octava es posterior al enventanado) y *Método 2* (el filtrado por bandas de octava es anterior al enventanado).

3.2. Descripción de los métodos

Haciendo referencia a la norma *ISO 3382:2010*, concretamente al apartado *A.3.4 Ventanas temporales y filtrado de las respuestas*, en ella se concreta que la respuesta impulsiva debería filtrarse en bandas de octava. Esto se realiza en ambos métodos, pero en qué momento del proceso es donde encontramos la diferencia entre ambos.

En el *Método 1*, a diferencia del *Método 2*, el filtrado se realiza tras un enventanado de la respuesta impulsiva en banda ancha. Para el segundo, al realizarse un filtrado como primer paso, se consideran los retardos que introducen los diferentes filtros de octava. Tales criterios se han considerado tras la lectura de la citada norma, la cual a continuación analizamos detalladamente.

Se explica que los filtros crean retrasos en la señal que pueden ser muy significativos en las bandas de octava inferiores de menor ancho de banda. Por tanto, el comienzo del impulso filtrado está retrasado respecto a la señal sin filtrar y también la señal filtrada continúa después de que acabe la señal sin filtrar. Esto crea problemas en parámetros acústicos donde las pequeñas porciones de intervalos temporales de la señal se filtran por bandas de octava.

La mejor aproximación que evita el retraso del filtro es aplicar una ventana temporal a la respuesta impulsiva en banda ancha antes de cualquier filtrado, proceso que se elabora en el *Método 1*.

Para este método, el comienzo de la respuesta impulsiva (**punto de inicio**) se determina a partir de la respuesta impulsiva en banda ancha y se considera como punto de inicio, el instante donde la señal sube de forma significativa por primera vez sobre el ruido de fondo y considerando un margen de 20 dB por debajo del máximo de la señal.

Para el *Método 2* el criterio es análogo pero, ya que este tratamiento es posterior al filtrado, se localiza un punto de inicio para cada una de las bandas de octava por separado.

Aclaradas las mayores diferencias que presentan los métodos, en los siguientes apartados del presente capítulo, se detallan los pasos elaborados a lo largo del proyecto. Se explica por separado la técnica utilizada para cada método.

3.3. Esquema general

A continuación se describen de forma esquemática los dos métodos elaborados, donde se aprecian claramente el proceso de cada uno de ellos:

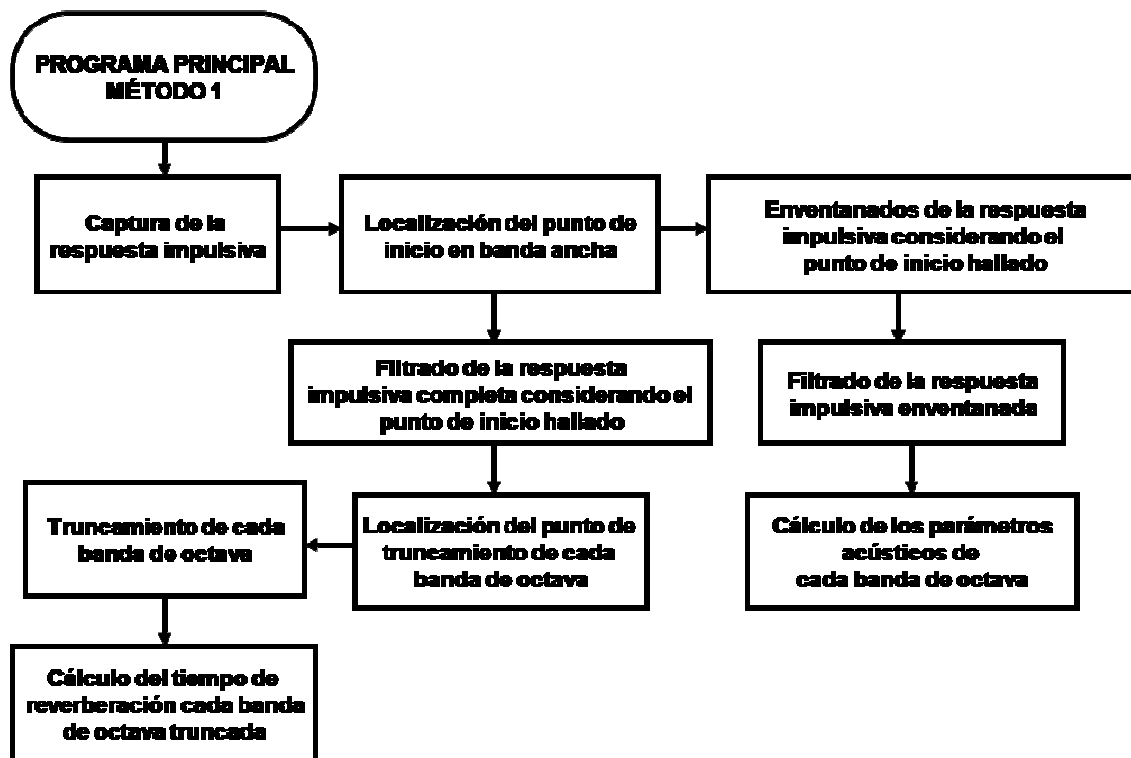


Figura 1. Esquema general del Método 1

El primer paso es la captura de la respuesta impulsiva. En el proceso de elaboración de este software, para la implementación de las diferentes subrutinas, se han trabajado con señales capturadas por el programa WinMLS. Para recoger estas señales en *Matlab* y así poder trabajar con ellas, se hace uso de la función *loadimp.m*. Dicha función, como parámetros de entrada, permite la introducción de la respuesta impulsiva medida con WinMLS (h_1) y la frecuencia de muestreo (fs). De este modo, se obtiene la respuesta impulsiva en formato compatible con *Matlab*.

Una vez capturada la respuesta impulsiva, el proceso a seguir es la definición del punto de inicio de la respuesta impulsiva en banda ancha. Esta rutina es común para los dos métodos, ambos consideran el mismo criterio para la determinación de este punto.

A diferencia del método 2, para el cálculo de los parámetros, en el *Método 1*, anterior a cualquier filtrado, se exige un criterio el cual determina que debe realizarse un enventanado de la respuesta en diferentes intervalos de tiempo. Estos intervalos van acorde con los intervalos temporales que requieren los parámetros acústicos.

Para la localización del punto de truncamiento de cada banda de octava se hace uso de los resultados obtenidos tras el filtrado de la respuesta impulsiva completa. El proceso iterativo para la determinación de este punto se explica detalladamente en el apartado (3.4.4.). Este punto de truncamiento se tendrá en cuenta para los cálculos de los tiempos de reverberación, los cuales requieren para su cómputo la respuesta impulsiva truncada.

Y como último paso, se implementa el cálculo de los diferentes parámetros acústicos, haciendo uso de la respuesta impulsiva enventanada y filtrada que requiera cada uno de ellos.

A continuación se muestra el esquema general del *Método 2*:

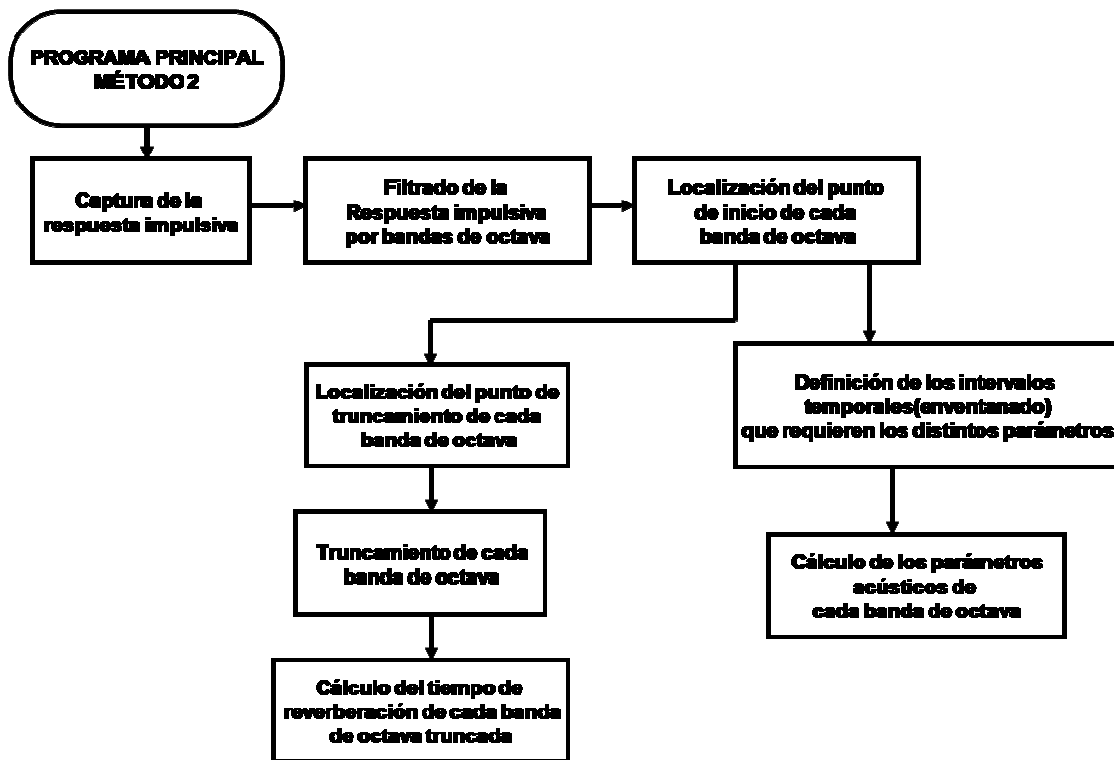


Figura 2. Esquema general Método 2

Al igual que en el *Método 1*, el primer paso es la captura de la respuesta impulsiva empleando la función *loadimp.m* de *Matlab*. A continuación se realiza el filtrado de la señal por bandas de octava, el cual con el uso de filtros paso banda, centrados en las frecuencias correspondientes, es una tarea sencilla.

Tras esta tarea se efectúa el truncamiento de la respuesta impulsiva (truncamiento de cada banda de octava) ya que es probable que esté contaminada por ruido, lo que provocaría una mala definición de los tiempos de reverberación. Para ello se definen el punto de inicio, al comienzo de la señal y el punto de truncamiento, al final de ésta.

Definidos estos límites temporales, la siguiente fase es la integración de la respuesta impulsiva para el cálculo de los tiempos de reverberación. Todas las cantidades y funciones deben derivar de la respuesta impulsiva mediante una serie de transformaciones. La modificación elemental para obtener el tiempo de reverberación es una integración invertida en el tiempo de la respuesta impulsiva. Esta integral es la curva de decaimiento, la cual, bajo la consideración de los puntos de fuente y receptor, es única.

Y finalmente el último punto es el cálculo de los parámetros acústicos que derivan de la respuesta impulsiva. Aplicando los algoritmos y fórmulas necesarias para su cálculo es un trabajo sencillo.

3.4. Rutinas

3.4.1. Introducción

A continuación se presentan las rutinas desarrolladas. Éstas son comunes para ambos métodos.

3.4.2. Filtrado por bandas de octava de la respuesta impulsiva

Los filtros producen retardos en la señal que pueden ser bastante significativos para las bandas de octava de baja frecuencia de ancho de banda más estrecho. Por ello, el inicio del impulso filtrado se retrasa con respecto a la señal no filtrada.

Para evitar los problemas de retardo debido al filtro se realiza, antes de cualquier filtrado, un enventanado temporal de la respuesta impulsiva en banda ancha. Este criterio se considera en el primer método, donde el punto de inicio se localiza en banda ancha y los componentes precoces y tardíos de la respuesta impulsiva se filtran por separado. Los periodos de integración se aumentan, mediante la adición de ceros al final del intervalo, para así incluir la energía retardada por los filtros.

En el segundo método, donde el primer paso es el filtrado de la señal en bandas de octava, se considera el retardo introducido por el filtro para evitar el problema citado. Este retardo es el tiempo necesario para que el filtro pierda la mitad de su energía tras haber recibido el impulso.

Sin embargo, el filtrado para ambos métodos se define de la misma manera. Para el primer método el filtrado se realiza sobre intervalos de tiempo y posterior a la localización del punto de inicio en banda ancha. Para el segundo método el filtrado se realiza anterior a la localización del punto de inicio, el cual se determina para cada banda de octava.

A continuación se describe el filtro *Butterworth* diseñado. Para más detalle consultar el ANEXO A.

Una banda de octava es una banda de frecuencia que está entre dos frecuencias con una relación de 2. Por ejemplo, la banda de octava de 1000 Hz comprende las frecuencias de 707 a 1414 Hz. Las octavas adyacentes también están espaciadas en una relación de 2, como las octavas de 500 y 1000 Hz. Los centros de las bandas de octava están normalizados por el ISO (International Organization for Standardization) a números redondeados como sigue: 63:125:250:500:1k:2k:4k:8k:16k Hz.

Para el filtrado por bandas de octava de la respuesta impulsiva, se emplea la función *butter.m*, la cual es útil para el diseño de filtros butterworth tanto digitales como analógicos. Asimismo, se definen las frecuencias de corte inferior y superior de cada banda, determinadas de la siguiente manera:

$$\text{Frecuencia de corte inferior: } \frac{f_{\text{central}}}{\sqrt{2}} \bigg/ \frac{f_{\text{muestreo}}}{2}$$

$$\text{Frecuencia de corte superior: } f_{\text{central}} \cdot \sqrt{2} \bigg/ \frac{f_{\text{muestreo}}}{2}$$

Considerando estas frecuencias de corte y definiendo un orden de 3 para el filtro, se han diseñado filtros paso banda correspondientes para cada banda frecuencial.

Cabe destacar que también se definen los retardos introducidos para cada banda de octava. Este retardo se define como el tiempo necesario para que el filtro pierda la mitad de su energía tras haber recibido un impulso.

El esquema general de este programa se observa en la a continuación:

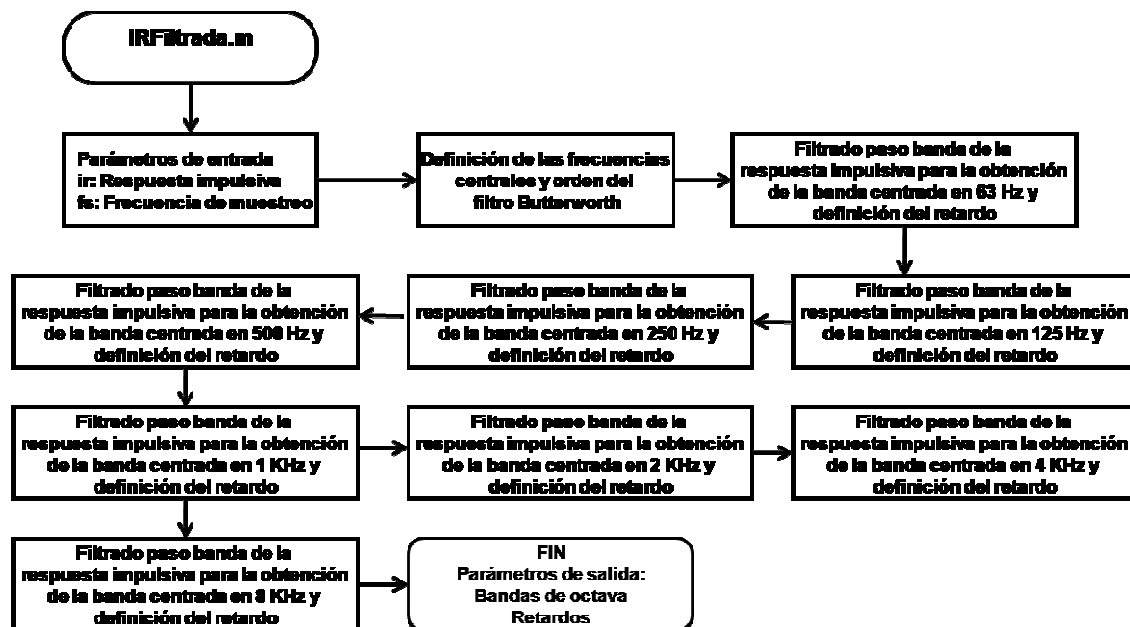


Figura 3. Filtrado por bandas de octava

3.4.3. Localización del punto de inicio

Se ha determinado el punto de inicio para definir el límite inicial de la integral que posteriormente es aplicada para el cálculo de la curva de decaimiento energético.

Como ya es sabido, para el primer método el punto de inicio se localiza en banda ancha y para el segundo el punto se ubica en cada banda de octava, por lo que para cada una de ellas este punto es diferente. Sin embargo, para ambos el criterio considerado es el mismo (*ISO 3381:2010*), éste considera el comienzo donde la señal aumenta de forma significativa por encima del ruido de fondo, pero esté mas de 20 dB (0.01 Pa en escala lineal normalizada) por debajo del máximo.

El esquema del algoritmo común para ambos métodos se presenta a continuación:

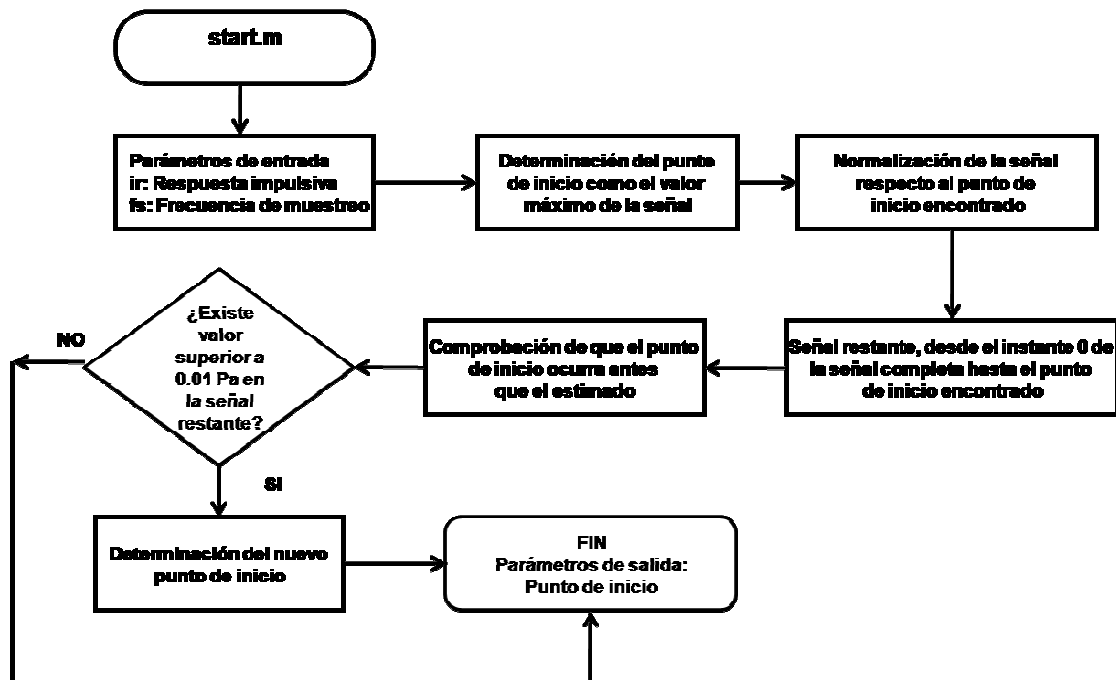


Figura 4. Determinación del punto de inicio

En el algoritmo implementado, previamente, se considera como punto de inicio el valor máximo de la señal, lo que conlleva un análisis erróneo. Considerando el criterio mencionado este equívoco queda solventado y la definición del punto de inicio se precisa con exactitud.

3.4.4. Punto de truncamiento de cada banda de octava

Para este punto ambos métodos trabajan de la misma manera, la localización del punto de truncamiento se determina para cada banda de octava y considerando el punto de inicio hallado anteriormente.

Para determinar el punto de truncamiento, el documento *Lundebj-Acustica 95* describe el algoritmo completo.

El proceso que se describe en este documento está basado en un promediado de tiempo corto de la respuesta impulsiva para estimar la energía tardía (ruido de fondo) y la caída constante de la respuesta impulsiva. La longitud óptima de los intervalos locales de tiempo depende de la frecuencia. Comenzando con un intervalo de tiempo de un rango comprendido entre 10 y 50 ms resulta ser una elección razonable. Intervalos de mayor longitud están relacionados con las bandas de baja frecuencia.

Por ello, se lleva a cabo un promediado diferente a bajas frecuencias. Para éstas el intervalo de tiempo será mayor. Si para las medias y altas bandas de frecuencia el intervalo de tiempo elegido es de 10 ms, para las bandas de baja frecuencia se optará por un intervalo mayor, por ejemplo de 50 ms.

En los siguientes puntos de la iteración, donde se realizan nuevos promediados de la respuesta impulsiva, se definen diferentes longitudes de intervalos. Éstos dependen de la pendiente y por lo tanto se utiliza esta estimación de la pendiente para elegir los nuevos intervalos de tiempo promediados, de 3 a 10 por cada 10 dB de caída. A continuación, la respuesta impulsiva es reajustada en estos nuevos intervalos de tiempo local.

Como criterio para la definición del punto de truncamiento, el cual ejerce como límite temporal en la integración invertida en el tiempo de la respuesta impulsiva, se considera que debe ser el punto donde la respuesta impulsiva topa con el nivel de ruido de fondo. Esto

conlleva a que su determinación requiera estimaciones de la caída tardía de la pendiente y del ruido de fondo.

El nivel del ruido de fondo se considera estacionario y puede ser determinado considerando la parte más tardía de la respuesta, donde el ruido predomina sobre la señal. Es deseable que se utilice el máximo de cola posible, a fin de minimizar variaciones estáticas. Por otro lado, la verdadera señal debe ser mantenida a una distancia segura, ya que la pendiente de la curva de decaimiento es estimada desde la parte tardía de la caída.

Se contempla que la estimación de estas dos cantidades, el nivel del ruido de fondo y la pendiente de la caída, son mutuamente dependientes, lo cual nos conduce a un algoritmo iterativo. El documento citado confirma que éste se hace estable tras 3 o 5 pasos.

A continuación se detalla cada paso del proceso y los criterios considerados en cada uno de ellos:

1. Promedio del cuadrado de la respuesta impulsiva en intervalos de tiempo local

El criterio requiere que la longitud del intervalo de tiempo sea de 10 a 50 ms, para dar una curva suavizada sin pérdidas cortas de caídas. Para las bandas de baja frecuencia son favorables intervalos más largos. Por ello se definen intervalos de 50 ms para las bandas de 63 Hz y 125 Hz, intervalos de 35 ms para las bandas de 250 Hz y 500 Hz, intervalos de 25 ms para las bandas de 1 KHz y 2 KHz e intervalos de 10 ms para las bandas de 4 KHz y 8 KHz.

2. Estimación del nivel de ruido de fondo utilizando la cola

El último 10% del tiempo de la respuesta impulsiva es considerado como ruido. Ésta es una selección estática razonable y por lo tanto el error sistemático no será muy grande si la caída continúa hasta el final de la respuesta.

3. Estimación de la pendiente de decaimiento desde 0 dB hasta el nivel del ruido

El punto “izquierdo” de la pendiente se considera a 0 dB. Posteriormente se busca el punto “derecho” a 5 dB sobre el nivel del ruido. Después se determina la pendiente de la regresión lineal entre estos dos puntos.

4. Encontrar el punto de cruce preliminar

Se estima como punto de truncamiento preliminar, el instante donde la pendiente de la regresión lineal topa con el ruido de fondo estimado en el paso 3.

5. Encontrar la longitud del nuevo intervalo de tiempo local

A partir de este punto comienza el proceso iterativo del algoritmo.

Aludiendo al documento *Lundebj-Acustica 95*, la longitud del intervalo elegida será dependiente de la pendiente estimada. Por ello el documento exige usar de 3 a 10 intervalos por cada 10 dB de caída. Para las bandas de octava de baja frecuencia serán preferibles pocos y más largos intervalos.

El algoritmo implementado, respaldando este criterio, considera 3 intervalos por cada 10 dB de caída para las bandas de 63 Hz y 125 Hz, 5 intervalos para las bandas de 250 Hz y 500 Hz, 7 intervalos para las bandas de 1 KHz y 2 KHz y 9 intervalos para las bandas de 4 KHz y 8 KHz.

6. Promediado del cuadrado de la respuesta impulsiva en los nuevos intervalos de tiempo

Al igual que en el paso 1, se realiza un promediado del cuadrado de la respuesta impulsiva. Sin embargo, se considera el criterio definido en el paso 5, donde el número de intervalos elegidos dependen de la frecuencia.

7. Estimación del nivel del ruido de fondo

En este caso, a la hora de estimar el nivel de ruido, se permite un margen de seguridad desde el punto de cruce, correspondiente a 10 dB de caída, pero utilizando un mínimo del 10% de la respuesta impulsiva. Esto es la compensación entre la estabilidad y la posibilidad de integración de la respuesta completa cuando no hay ruido significativo.

8. Estimar la caída tardía de la pendiente

Se evalúa un rango dinámico de 20 dB de la envolvente estimada, empezando por 5 dB sobre el nivel del ruido para la definición de la pendiente.

9. Encontrar el punto de cruce

Al igual que en el paso 4, se define como punto de truncamiento, el punto de cruce entre la regresión lineal del paso 8 y el nivel de ruido estimado en el paso 7.

Este último punto se considera como el final de la iteración. El proceso se repetirá hasta conseguir una convergencia del punto de truncamiento de 0.001. Esta convergencia se define mediante el siguiente principio:

$$\frac{pto_{actual} - pto_{anterior}}{pto_{anterior}}$$

A continuación se muestra el mismo proceso iterativo completo de forma esquemática:

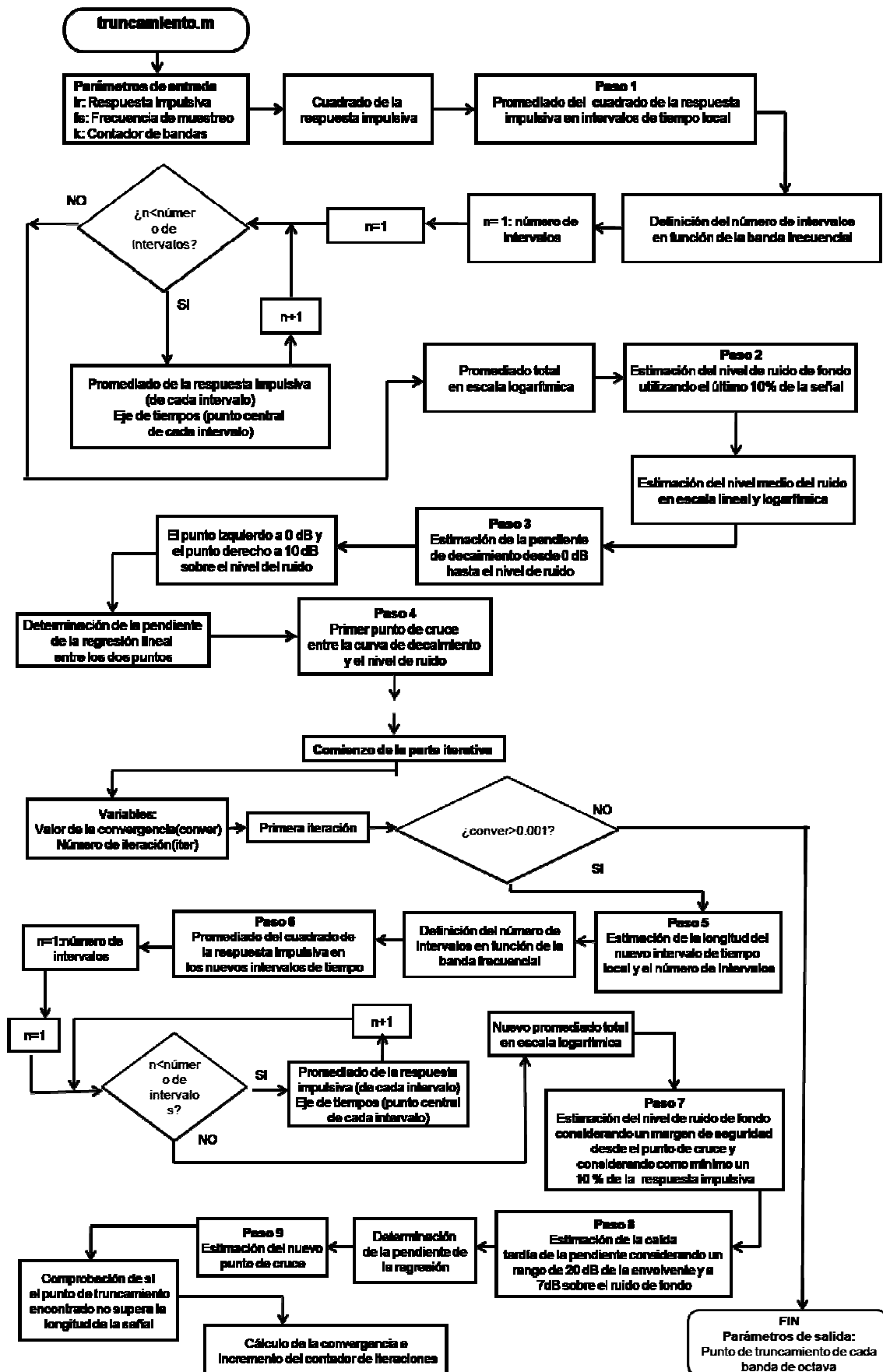


Figura 5. Localización del punto de truncamiento

3.4.5. Truncamiento de cada banda de octava

Una vez encontrados el punto de inicio y el punto de truncamiento, cada banda de octava es truncada para posteriormente realizar la integración invertida en el tiempo y así determinar los tiempos de reverberación. Para el cálculo de los parámetros derivados de la respuesta impulsiva se considera la respuesta impulsiva sin trincar, solamente se considera el punto de inicio hallado.

El proceso del truncamiento es simple, ya que simplemente consiste en un corte de la respuesta impulsiva entre estos dos puntos.

3.4.6. Curva de decaimiento energético y determinación de los tiempos de reverberación de cada banda de octava

Para ambos métodos estos tiempos son evaluados a partir de la pendiente de la curva de la respuesta impulsiva integrada. La pendiente de la curva de decrecimiento se determina a partir de la pendiente de la línea de regresión lineal “con mejor ajuste” (Norma ISO 3382:2010).

Para la obtención de la curva de decaimiento energético (EDC), se realiza una integración invertida en el tiempo de los cuadrados de la respuesta impulsiva (integral de Schroeder).

Los tiempos de reverberación calculados son:

EDT (Early Decay Time): Se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que la fuente deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB, por lo que se obtiene a partir de los primeros 10 dB de caída. El tiempo de caída se calcula a partir de esta pendiente y extrapolándola a una caída de 60 dB.

T20: Se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB. Para la obtención de este tiempo de reverberación, se considera la porción de caída comprendida entre -5 dB y -25 dB por debajo del nivel inicial máximo. Posteriormente el tiempo de caída se calcula extrapolando esta pendiente a una caída de 60 dB.

T30: Su definición es análoga que para el caso del T20, pero en esta ocasión se considera la porción de caída comprendida entre -5 dB y -35 dB por debajo del nivel inicial máximo. Como en el caso anterior, el tiempo de caída se calcula extrapolando esta pendiente a una caída de 60 dB.

El proceso completo se observa en la siguiente figura:

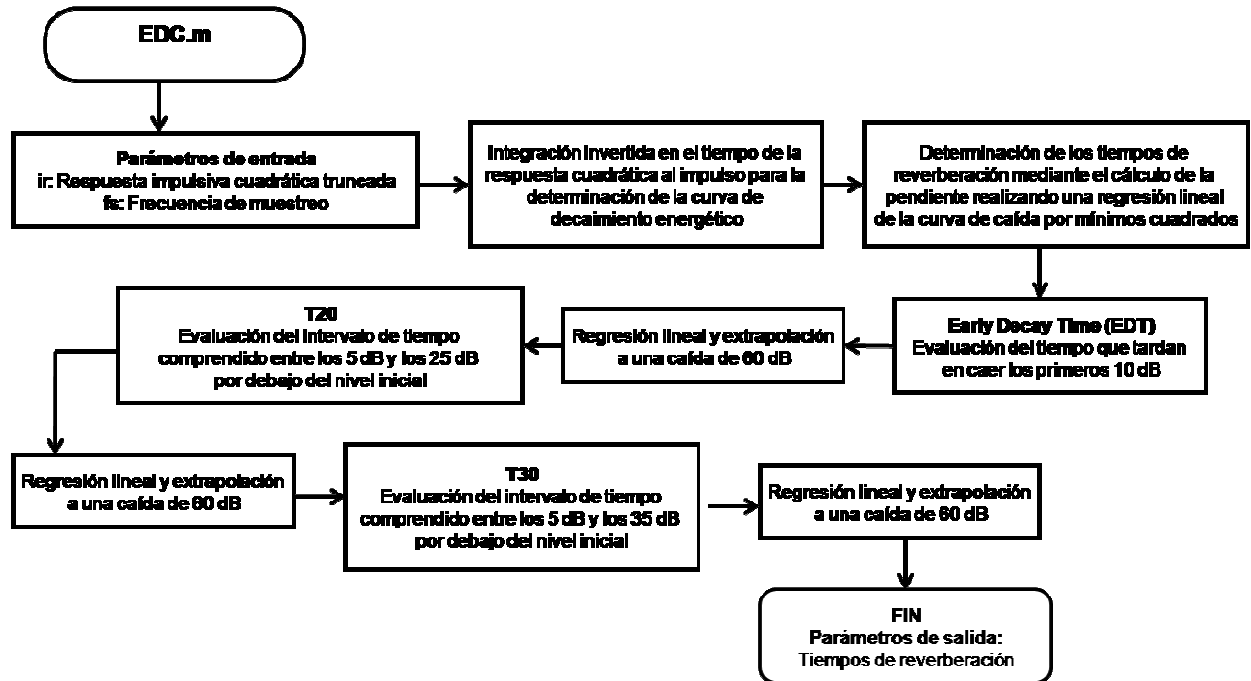


Figura 6. Cálculo de los tiempos de reverberación

3.4.7. Energía de compensación

El truncamiento de la respuesta impulsiva, realizado antes de la integración invertida en el tiempo (curva de decaimiento energético) produce un error sistemático, provocado por la pérdida de energía desde el punto de truncamiento al infinito.

Para solucionar este problema, podemos “inventar” una curva basada en la extrapolación de la regresión lineal, de la última iteración, realizada en el proceso de truncamiento. Ha continuación se podrá calcular la energía total desde el punto de truncamiento al infinito.

Esta curva “inventada”, es conocida como la **Energía de Compensación Total, E_{comp}** . Hay que destacar que es esencial que la regresión lineal corresponda con la caída tardía de la pendiente, cerca del punto de truncamiento.

Obtenidos los coeficientes de la regresión lineal, podemos encontrar una expresión para la caída exponencial asumida. Un método simple para llevar esto a cabo, es considerar las energías equivalentes que hay en dos puntos del eje temporal. En concreto estos dos instantes serán el punto cero y el punto donde la regresión lineal se encuentra con el nivel de ruido, t_1 , considerando siempre un margen de seguridad.

La densidad de energía en el punto cero es el coeficiente B de la regresión lineal y la densidad de energía en t_1 es la densidad de la energía del ruido, N (la densidad de energía es considerada como densidad temporal, por lo que es calculada mediante integración sobre intervalos cortos de tiempo). Es importante asegurar una normalización correcta.

La expresión para el decaimiento exponencial asumido se puede plantear como:

$$r(t) = B \cdot e^{At}$$

Donde B es conocida y A viene dada por:

$$A = \frac{\ln\left(\frac{N}{B}\right)}{t_1}$$

Sabiendo que el valor de A es negativo, la energía de compensación total, puede calcularse de la siguiente manera:

$$E_{comp} = B \int_{t_1}^{\infty} e^{At} dt = -\frac{B}{A} e^{At_1}$$

A continuación se muestra una gráfica tomada del documento *Lundeby-Acustica 95*:

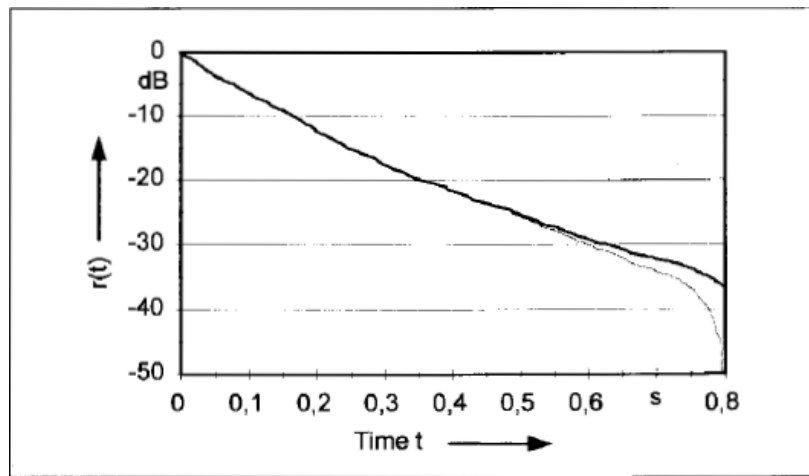


Figura 7. Respuesta impulsiva integrada con y sin compensación por ruido de fondo

La *Figura 7* muestra un ejemplo de una respuesta impulsiva integrada con y sin el correcto truncamiento y compensación, donde la relación señal ruido de la respuesta impulsiva suavizada es igual a algo menos de 40 dB y el punto de truncamiento se halla donde la señal tiene un valor de -36 dB. Como se puede observar es en este punto donde se produce un “codo”. Considerando la energía de compensación calculada esta caída de la señal en el punto de truncamiento se elimina.

Es importante considerar que si no se tiene en cuenta la compensación el T_{30} es infravalorado sobre el 8%.

Hay que reparar en que para la evaluación del T_{30} , la relación señal ruido, en el caso en el que no se considera la energía de compensación, debe ser de unos 45 dB. Por otro lado, para el caso en que consideramos la energía de compensación esta relación será de unos 35 dB mas cierto número de decibelios consideramos como margen de seguridad.

Para el cálculo de la energía de de compensación se ha seguido el siguiente esquema:

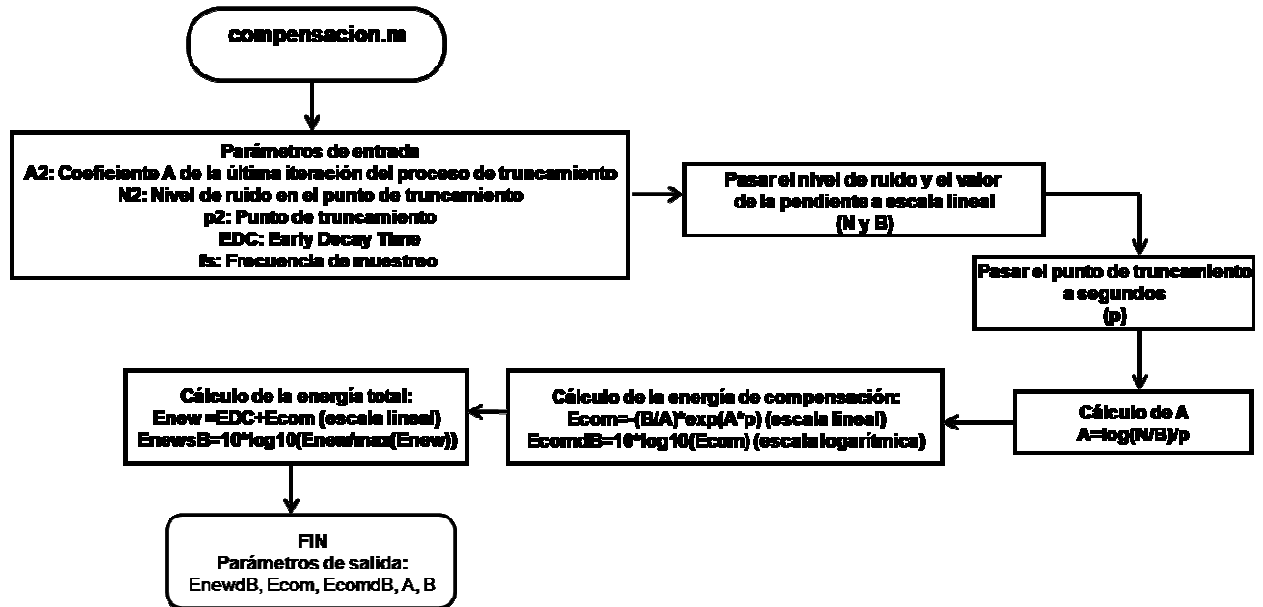


Figura 8. Cálculo de la energía de compensación

3.4.8. Determinación de los parámetros acústicos de cada banda

En este punto del programa se definen tres parámetros diferentes, los cuales están relacionados con la energía acústica inicial y final. El cálculo de estos es una simple aplicación del algoritmo necesario para su determinación.

Los parámetros acústicos derivados de la respuesta impulsiva calculados son:

C₅₀: La claridad de la voz, es la relación entre la energía contenida en los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la energía que llega posteriormente, expresada en escala logarítmica.

C₈₀: A diferencia del parámetro anterior, en este caso se consideran los primeros 80 ms en vez de 50 ms. Considerando esta diferencia, su definición es como la del C₅₀.

D₅₀: La definición es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo.

Ts: Se define como el primer momento de la respuesta cuadrática al impulso.

En este punto existen diferencias entre los dos métodos. Para el primero, en el cual el inventariado se ha definido acorde con los intervalos de tiempo que requiere cada parámetro, se realiza el filtrado sobre estos intervalos, y a continuación se integran para el cálculo que requiere cada uno de los parámetros.

Para el segundo método, los intervalos se definen tras el filtrado y se considera el retardo introducido por los filtros.

En las siguientes figuras se muestran los procesos para los dos métodos.

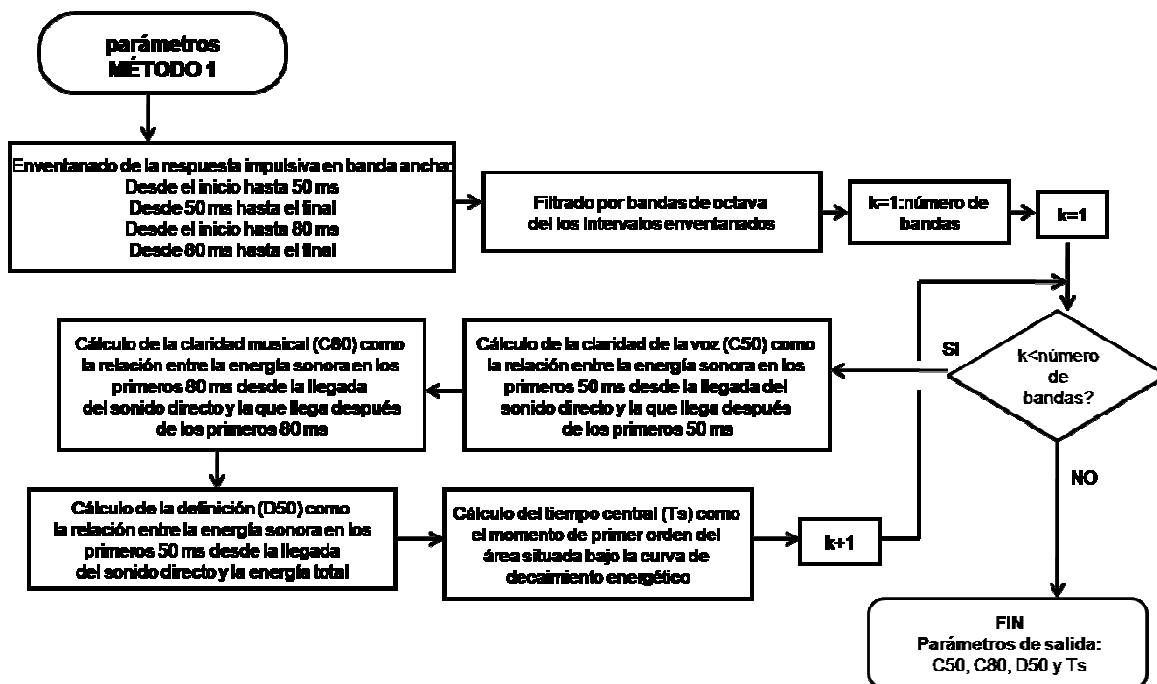


Figura 9. Cálculo de los parámetros para el método 2

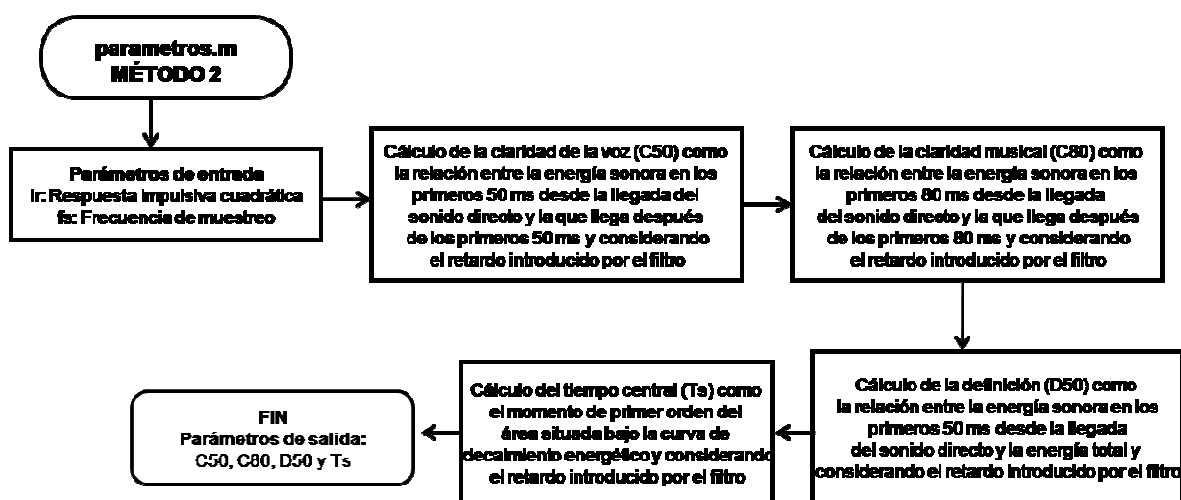


Figura 10. Cálculo de los parámetros para el método 2

3.4.9. Determinación de los parámetros laterales y binaurales de cada banda de octava

Al igual que en los parámetros anteriores para el cálculo de los parámetros laterales y binaurales encontramos la misma diferencia. Para el *Método 1* trabajamos sobre los intervalos enventanados y posteriormente son filtrados y para el *Método 2* el intervalo se define para cada una de las bandas de octava filtradas.

Los parámetros calculados en este caso son los siguientes:

LF: La fracción de energía que llega lateralmente dentro de los 80 ms iniciales, se puede medir a partir de las respuestas impulsivas de un micrófono omnidireccional y de un micrófono bi-direccional de respuesta en ocho.

LFC: Se utiliza como alternativa al LF, se utiliza par la obtención de las fracciones de energía lateral, con contribuciones que varían únicamente con el coseno del ángulo, considerada subjetivamente más precisa.

Teniendo en cuenta la diferencia mencionada para los métodos, el esquema general que sigue el cálculo de estos dos parámetros se muestra a continuación:

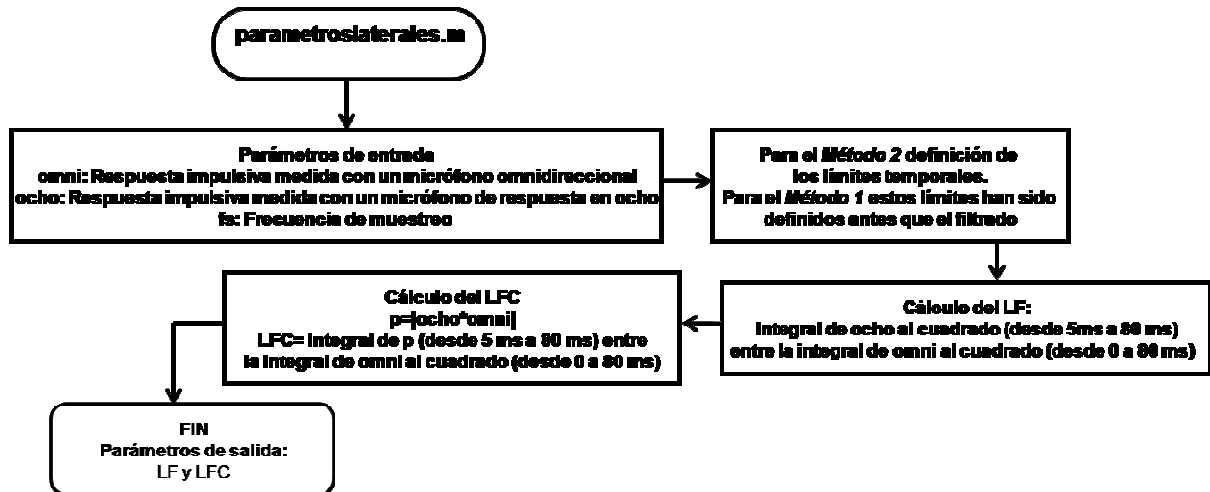


Figura 11. Cálculo de los parámetros laterales

IACC: Los estudios subjetivos de los auditorios han demostrado que los coeficientes de correlación cruzada interaurales, medidos tanto con una cabeza artificial como con una cabeza real, con las mismas dimensiones promediadas que las cabezas artificiales, y con pequeños micrófonos en la entrada de los canales auditivos, se corresponden bien con la calidad subjetiva “impresión espacial” en una sala de conciertos.

Tal y como plantea la norma *ISO 3382-2010*, los usos de los IACC todavía no se han aceptado de manera uniforme, su aplicabilidad subjetiva sigue siendo objeto de discusión e investigación. Asimismo, se han propuesto diferentes enfoques con respecto a la elección de los límites t_1 y t_2 y el filtrado en frecuencia de las señales.

Por ello, se definen tres IACCs diferentes. El IACCA, el más general de los tres, se define para $t_1=0$ y $t_2=\infty$. Por otro lado está el IACCE, el cual sirve para describir la semejanza de la llegada de la señal en los dos oídos para las reflexiones tempranas ($t_1=0$ y $t_2=80$ ms) y para el caso en el sonido reverberante ($t_1=80$ ms y $t_2=\infty$), existe el IACCL.

Para el cálculo de estos parámetros la fórmula que se debe seguir es la siguiente:

$$IACF_{t_1,t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t+\tau) dt}{\left[\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

Definiendo para cada uno de ellos los límites temporales que requieren.

El dividendo es la correlación entre las integrales de las dos señales (señal en el canal del oído derecho y señal en el canal del oído izquierdo) y el divisor es una simple raíz cuadrada de la multiplicación de las integrales de las dos señales al cuadrado.

Una vez obtenido este valor, el IACC se definirá como el máximo valor absoluto del IACF.

Los esquemas generales para el cálculo de estos parámetros se presentan a continuación. Para ambos métodos el algoritmo que se aplica es el mismo.

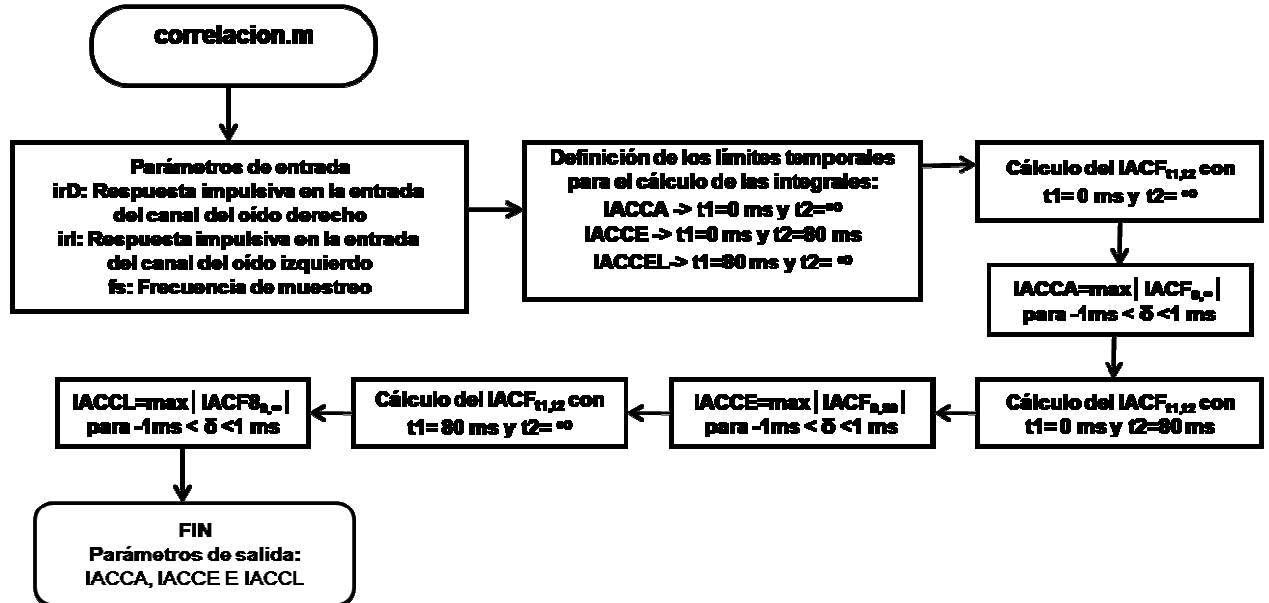


Figura 12. Correlación cruzada interaural



RESULTADOS

4. RESULTADOS

En este capítulo se realiza un análisis exhaustivo de los dos métodos por separado. De esta forma se podrán observar los diferentes resultados aportados por cada uno de ellos.

4.1. Método 1

4.1.1. Introducción

Se analizan y discuten los resultados obtenidos para este primer método. Se examina cada paso del software, mostrando gráficamente la solución en cada uno de ellos.

Para observar los resultados mediante el uso de este método y la comparativa de éste con el WinMLS, se accederá a la lectura del apartado 4.3.

4.1.2. Captura de la respuesta impulsiva

Mediante la función *loadimp.m* que dispone *Matlab*, se realiza la captura de la respuesta impulsiva, sobre la cual se aplican todos los cálculos. Durante la elaboración de este proyecto se ha utilizado una respuesta impulsiva cualquiera. En concreto, una respuesta impulsiva evaluada por el programa de análisis acústico *WinMLS*. Se han utilizado las señales captadas por este programa, y los resultados obtenidos se han valorado realizando la comparativa con el citado programa.

La señal con la que se ha trabajado es una respuesta impulsiva captada en un estudio elaborado en el *Teatro Gayarre* de Pamplona.

A continuación se muestra esta señal impulsiva normalizada, en escala lineal y logarítmica, con respecto al valor máximo de la señal:

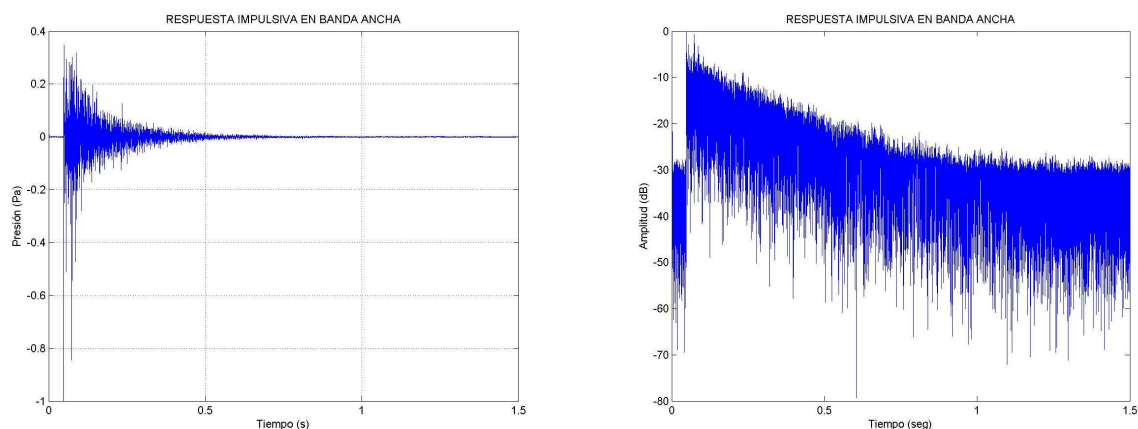


Figura 13. Respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Corresponde a una respuesta impulsiva con un TR_{mid} cercano a 1 segundo.

Como se puede observar al inicio de esta señal capturada hay un intervalo de tiempo donde no existe presión acústica. Este intervalo es eliminado para llevar a cabo el análisis de la señal.

4.1.3. Punto de inicio de la respuesta impulsiva en banda ancha

Siguiendo el criterio expuesto por la norma *ISO 3382/2010* (ver apartado 5.4.2.), el punto hallado como inicio de la respuesta impulsiva en banda ancha se considera óptimo. Tras el cómputo de la rutina se determina este inicio en la muestra 2273, o lo que es lo mismo en el segundo 0.04735.

El criterio que se ha considerado es que el punto de inicio debe ser el instante donde la señal aumenta de forma significativa por encima del ruido de fondo, pero está más de 20 dB (ó 0.01 pascales, en escala lineal) por debajo del valor máximo de la señal.

A la hora de evaluar la señal y encontrar el punto de inicio, éste se ha encontrado trabajando con la señal en escala lineal. En un primer momento se consideró como inicio el valor máximo de la señal. Sin embargo, estudiando el criterio expuesto por la norma citada, se ha tenido que evaluar el intervalo de tiempo anterior a este punto y a partir de ahí considerar como inicio el valor mínimo de la señal donde su valor es 0.01 pascales sobre el máximo normalizado.

En la siguiente gráfica se muestra el punto de inicio hallado respecto al tiempo:

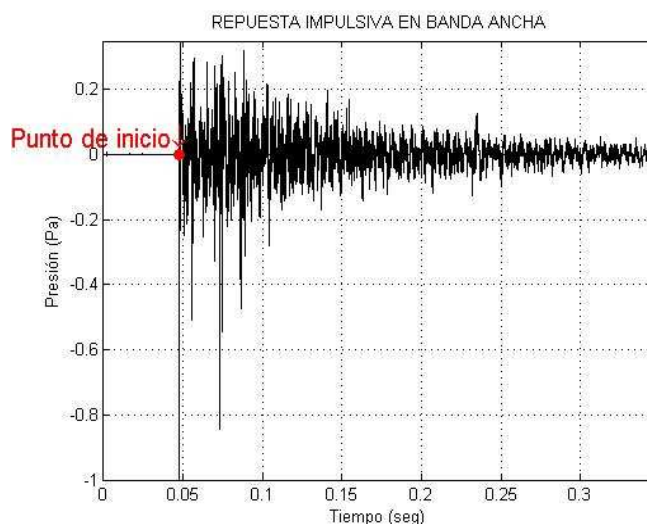


Figura 14. Punto de inicio en segundos

4.1.4. Enventanado de la respuesta impulsiva en banda ancha

El enventanado de la respuesta impulsiva se realiza para diferentes intervalos de tiempo. Estos rangos dependerán de los intervalos de tiempo que requieren los diferentes parámetros para su cálculo.

Para el C_{50} , se enventana la señal en intervalos que van de 0 a 50 ms y de 50 ms a el final de la respuesta impulsiva. Para el caso del C_{80} en vez de considerar 50 ms se consideran 80 ms.

Para el LF y el LFC, para los cuales se debe considerar las señales captadas por un micrófono omnidireccional y por otro en forma de ocho, se enventanan estas dos señales en intervalos que van de 5 ms a 80 ms. Para este caso, también se tiene en cuenta el intervalo enventanado que va desde 80 ms hasta el final de la respuesta impulsiva.

Y por último queda la definición de los intervalos para el parámetro IACC. Encontramos tres parámetros diferentes, IACCA, IACCE e IACCL, los cuales se diferencian por los intervalos que consideran para su cálculo. Para el cómputo de estos se realiza el enventanado de dos

señales diferentes, la respuesta impulsiva en la entrada del canal del oído derecho y la respuesta impulsiva en la entrada del canal del oído izquierdo. Los intervalos que requieren estos parámetros son: de 0 ms hasta el final de las respuestas impulsivas para el IACCA, de 0 ms a 80 ms para el IACCE y de 80 ms hasta el final de las respuestas impulsivas para el IACCL.

Para este primer método, a diferencia del *Método 2*, no se considera el retardo introducido por el filtro. En vez de considerar este retardo se aumentan los periodos de integración (se añaden ceros) para incluir la energía retardada por los filtros. Tras varias pruebas realizadas, mediante la comparación de los resultados aportados por el programa *WinMLS*, se ha considerado una agregación de 5000 ceros en muestras.

4.1.5. Filtrado por bandas de octava

El filtrado por bandas de octava se realiza sobre la respuesta impulsiva en banda ancha y sobre los intervalos definidos tras el enventanado.

El análisis del filtro utilizado se realiza en el apartado referente al *Método 2* de este capítulo. Es en este último donde tiene una mayor importancia el filtrado por bandas. Sin embargo, se puede analizar el comportamiento del filtro en el ANEXO A.

4.1.6. Punto de truncamiento de cada banda de octava

El siguiente tratamiento que se efectúa sobre la señal es su truncamiento. Las respuestas impulsivas medidas están contaminadas por ruido y deben ser truncadas de una forma razonable para así eliminarlo.

Tras la implementación del método presentado por el documento *Lundeby-Acustica 95*, el cual describe un algoritmo iterativo, se han determinado los puntos de truncamiento correspondientes a cada banda de octava.

El código generado, el cual es rápido y preciso, puede ser implementado con y sin promediado. Pero con la intención de reducir la influencia de las fluctuaciones, tal y como dice el documento, la mejor solución ha sido optar por un promediado de la respuesta impulsiva, lo cual es exigido por el método en sí.

Aplicando criterios diferentes para bajas, medias y altas bandas de frecuencia y realizando la comparativa con los resultados aportados por el programa *WinMLS* (ver apartado 4.3.), el valor de los puntos de truncamiento para cada banda de octava se han aceptado como óptimos.

A continuación se expone todo el proceso iterativo de forma gráfica para la banda de 1 KHz (para el resto de bandas ver ANEXO B). Esta ayuda visual es favorable para la comprensión de todo el proceso.

Paso 1: Promedio del cuadrado de la respuesta impulsiva en intervalos de tiempo local

Dependiendo de la banda de octava en la que se esté trabajando se consideran intervalos de tiempo diferentes. Para las bandas de octava centradas en 63 Hz y 125 Hz, el tamaño del intervalo es de 50 ms, para las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz el tamaño es de 35 ms, para las bandas de 1 KHz y 2 KHz el tamaño es de 25 ms y para las bandas de 4 KHz y 8 KHz el tamaño es de 10 ms.

Una vez definidos estos intervalos se calculan los tamaños de los intervalos para cada banda de octava y posteriormente se calcula la envolvente o media de cada señal en escala lineal y logarítmica.

Se puede observar (ver ANEXO B) como la curva definida tras el promediado es más suave a frecuencias mayores al considerar intervalos de mayor tamaño para bandas de octava de menor frecuencia.

El promediado correspondiente a la banda de 1 KHz se muestra a continuación:

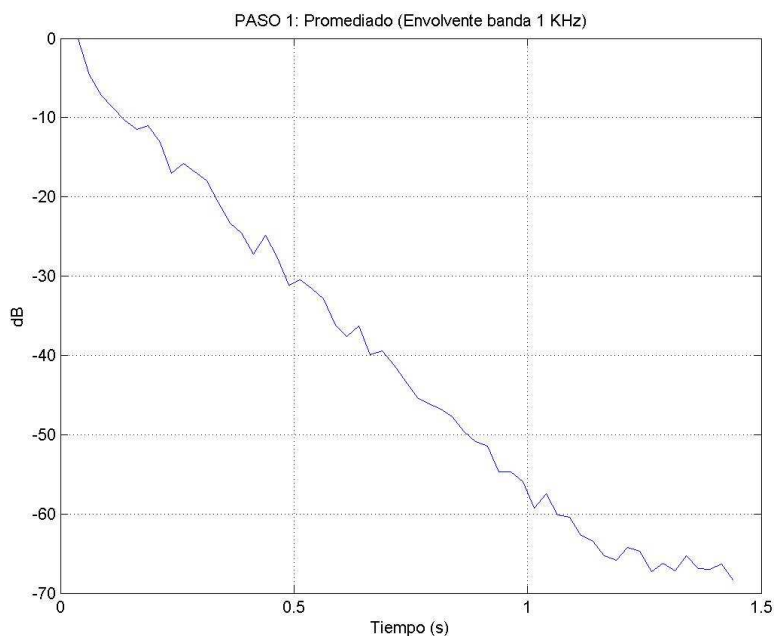


Figura 15. Promediado de la banda centrada en 1K Hz

Paso 2: Estimación del nivel de ruido de fondo utilizando la cola

Se considera el último 10 % de la envolvente calculada en el paso anterior. Se consiguen los niveles de esta primera estimación del ruido de fondo en escala logarítmica y lineal.

La longitud en muestras de la señal es de 72000 menos el intervalo eliminado tras la definición del punto de inicio, el cual es de 2273 muestras (da como resultado 69727 muestras). Sabido esto el 10% de este intervalo es de 6972,7, o lo que es lo mismo 0.15 segundos aproximadamente. Es de este intervalo del final del promediado desde donde se calcula el nivel de ruido para cada una de las frecuencias.

El nivel de ruido de fondo obtenido para la banda de octava de 1 KHz se muestra a continuación:

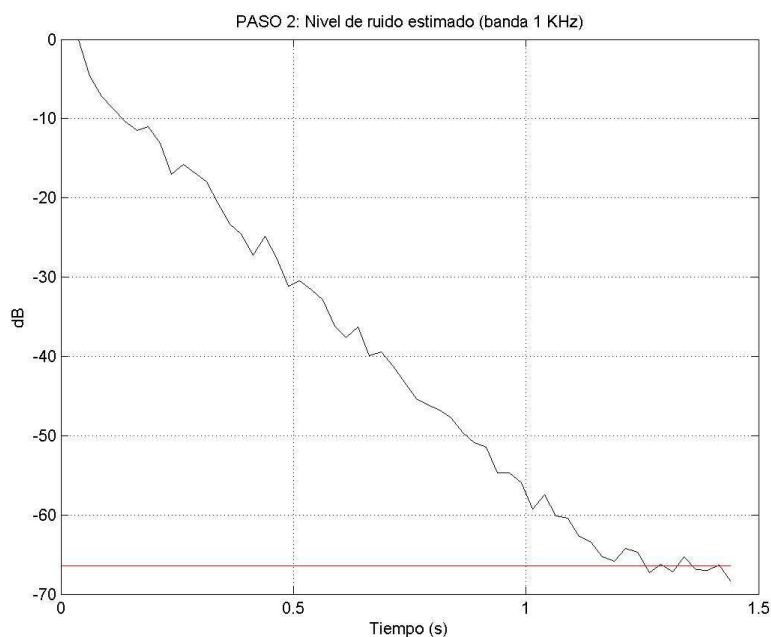


Figura 16. Nivel de ruido de fondo de la banda centrada en 1 KHz

Paso 3: Estimación de la pendiente de decaimiento desde 0 dB hasta el nivel del ruido

Para la estimación de la pendiente de decaimiento se realiza una regresión lineal. Se considera como punto izquierdo el comienzo de la envolvente calculada en el paso 1 y como punto derecho se considera el instante máximo donde existe un margen de 5 dB sobre el nivel de ruido estimado en el paso 2.

Esta curva para el caso de la banda centrada en 1 KHz es de la siguiente manera:

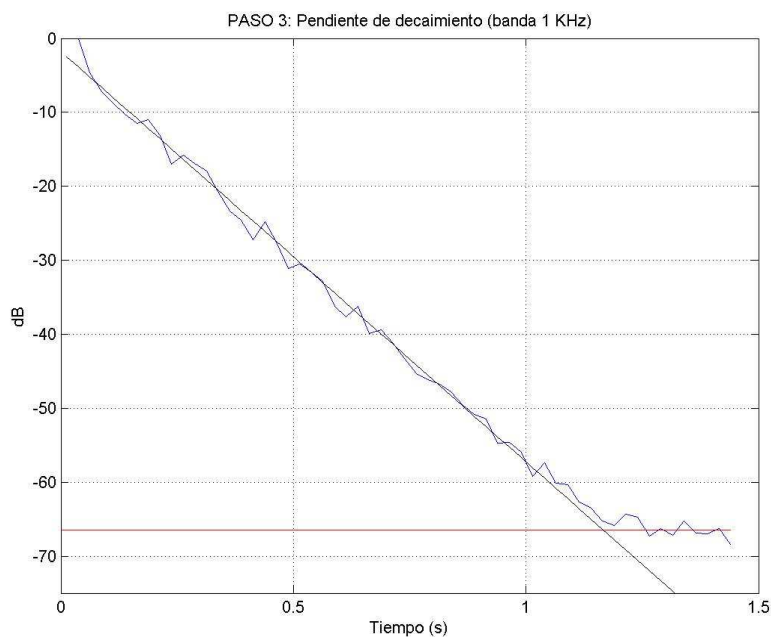


Figura 17. Pendiente de decaimiento para la centrada en 1 KHz

Paso 4: Encontrar el punto de cruce preliminar

Una vez obtenidas las pendientes y niveles de ruido de cada banda de octava, se define el primer punto de cruce como la intersección entre estas dos curvas.

En la siguiente figura se indica el punto de cruce preliminar para la banda de 1 KHz:

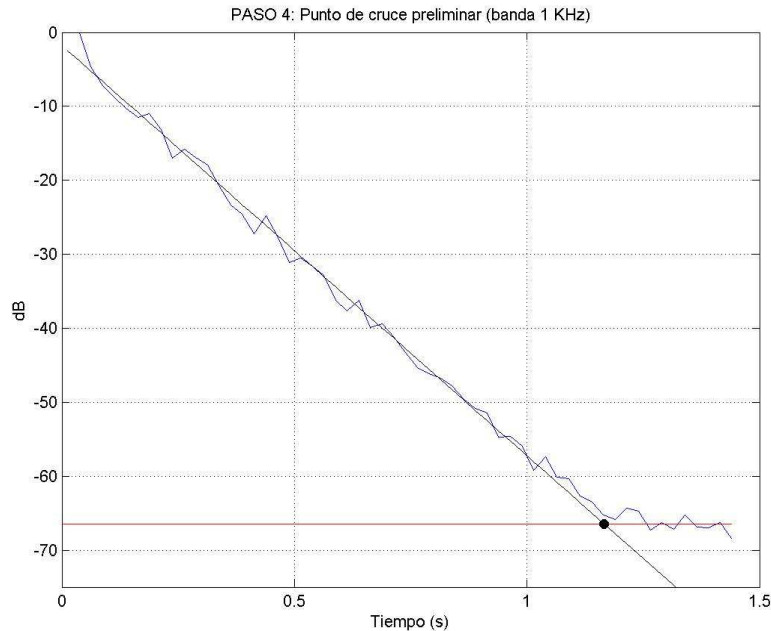


Figura 18. Punto de cruce preliminar para la banda centrada en 1 KHz

A partir de este punto comienza la parte iterativa del proceso de estimación del punto de truncamiento para cada banda de octava.

Tomando como criterio una convergencia de 0.001, se analizan los valores obtenidos para la última iteración del proceso.

Dicha convergencia se evalúa considerando el punto de cruce actual en la iteración y el anterior a este mediante el siguiente cálculo:

$$\frac{pto_{actual} - pto_{anterior}}{pto_{anterior}}$$

Para la señal que estamos analizando se cumple una iteración de 3 pasos para cada una de las bandas de frecuencia.

Paso 5: Encontrar la longitud del nuevo intervalo de tiempo local

Esta longitud está definida a partir de la pendiente estimada en el paso 3. Dependiendo de la banda de octava en la que estemos trabajando la longitud del intervalo será diferente. Para la definición de esta longitud, determinamos un número de intervalos finito por cada 10 dB de caída de la pendiente.

Para las bandas de octava centradas en 63 Hz y 125 Hz se consideran 3 intervalos por cada 10 dB de caída, para las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz 5 intervalos, para las centradas en 1 KHz y 2 KHz 7 intervalos de caída y para las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz 9 intervalos.

Considerando este número de intervalos y definiendo el número de muestras para una caída de 10 dB, encontramos el tamaño de los intervalos para cada banda de octava y de ahí el número de intervalos con los que calcularemos la nueva media de la respuesta impulsiva en el siguiente paso.

Paso 6: Promediado del cuadrado de la respuesta impulsiva en los nuevos intervalos de tiempo

Definidos los números de intervalos para cada banda de frecuencia, se calcula el nuevo promediado en escala lineal y logarítmica.

Al igual que ocurre en el paso 1, la curva de la envolvente es más suave para altas frecuencias.

En la siguiente gráfica se observa la envolvente de la banda centrada en 1 KHz:

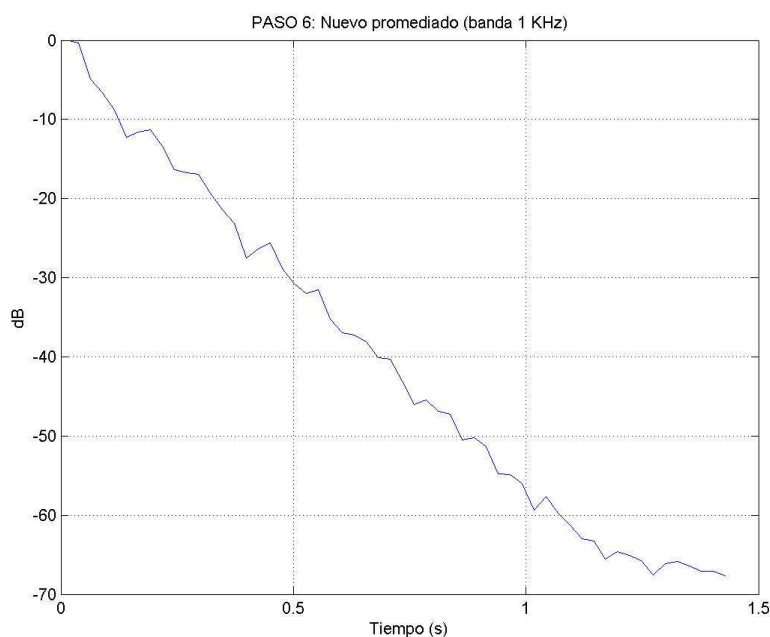


Figura 19. Promediado de la banda centrada en 1 KHz en nuevos intervalos de tiempo

Paso 7: Estimación del nivel del ruido de fondo

En este caso para definir el nivel de ruido, se mantiene un margen de seguridad de 10 dB de caída a partir del punto de cruce preliminar. Valorando esto y considerando como mínimo un 10% de la respuesta impulsiva se define este valor en escala lineal y logarítmica.

Los niveles de ruido de fondo estimados (normalizados respecto al valor máximo de la media) para cada banda de octava se muestran en el ANEXO B. Para el caso de la banda centrada en 1 KHz concretamente, el resultado se muestra a continuación:

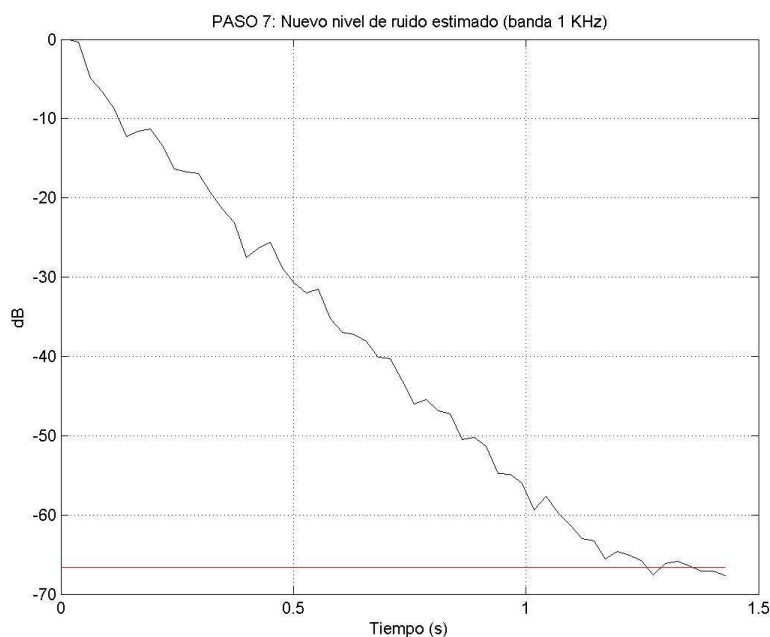


Figura 20. Nivel de ruido de fondo para la banda centrada en 1 KHz

Paso 8: Estimación de la caída tardía de la pendiente

Al igual que en el paso 3, se estima la pendiente de decaimiento a partir del último promediado calculado. Sin embargo, en este caso se evalúa un rango de 20 dB, empezando a 5 dB sobre el nivel de ruido de fondo.

Para el caso de la banda centrada en 1 KHz, la pendiente sigue la siguiente tendencia:

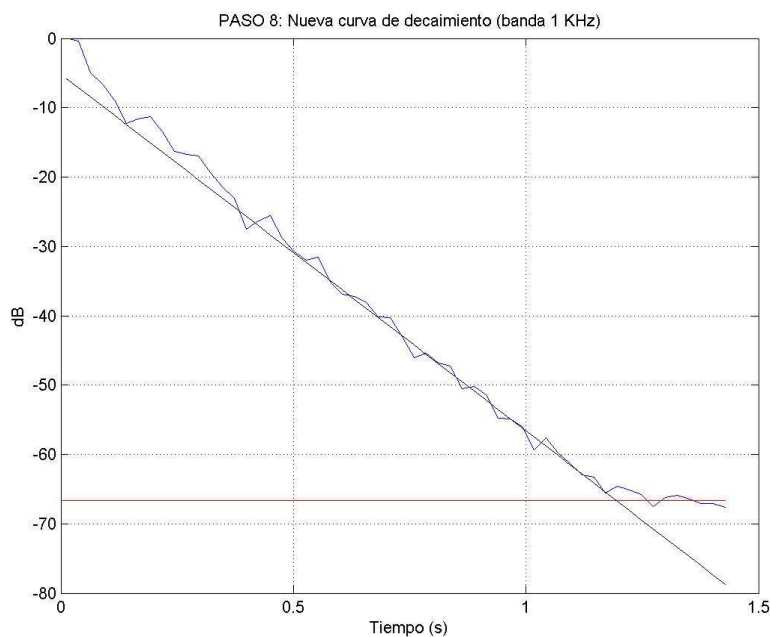


Figura 21. Pendiente de decaimiento para la banda centrada en 1 KHz

Paso 9: Encontrar el punto de cruce

Y ya para concluir con el proceso iterativo, al igual que en la operación elaborada en el paso 4, se determina el punto de cruce entre el nivel de ruido estimado y la pendiente calculada.

Como ya se ha mencionado, este es el último paso de la iteración. Para este punto de cruce en cuestión se cumple el criterio de convergencia especificado.

Para el caso de la banda centrada en 1 KHz el punto de truncamiento es el siguiente:

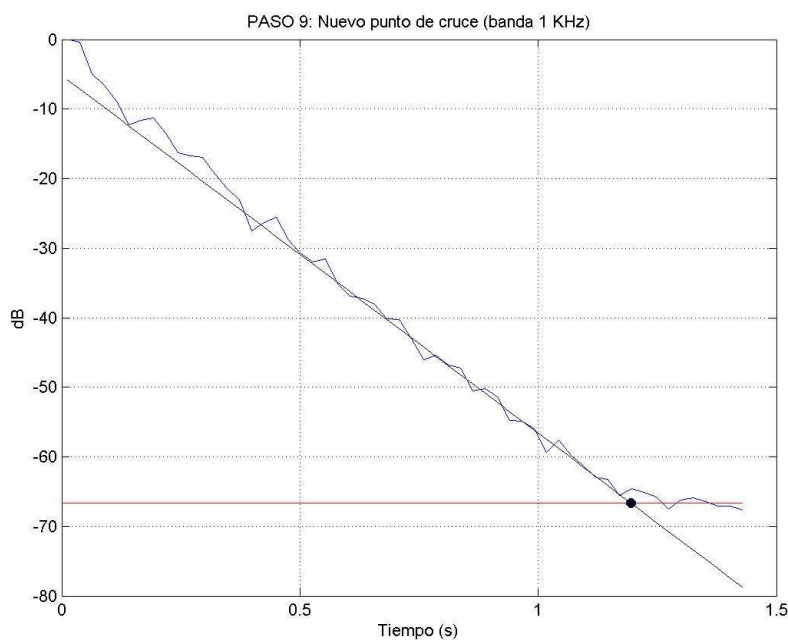


Figura 22. Punto de truncamiento para la banda de 1 KHz

Y para finalizar con este apartado a continuación se muestran las gráficas de cada banda de octava, donde se pueden observar las respuestas impulsivas al cuadrado en dB's sobre la envolvente, el nivel de ruido, la curva de decaimiento y el punto de cruce de la última iteración del código generado.

Con la visualización de estas gráficas se aprecia claramente que todos los cálculos son correctos:

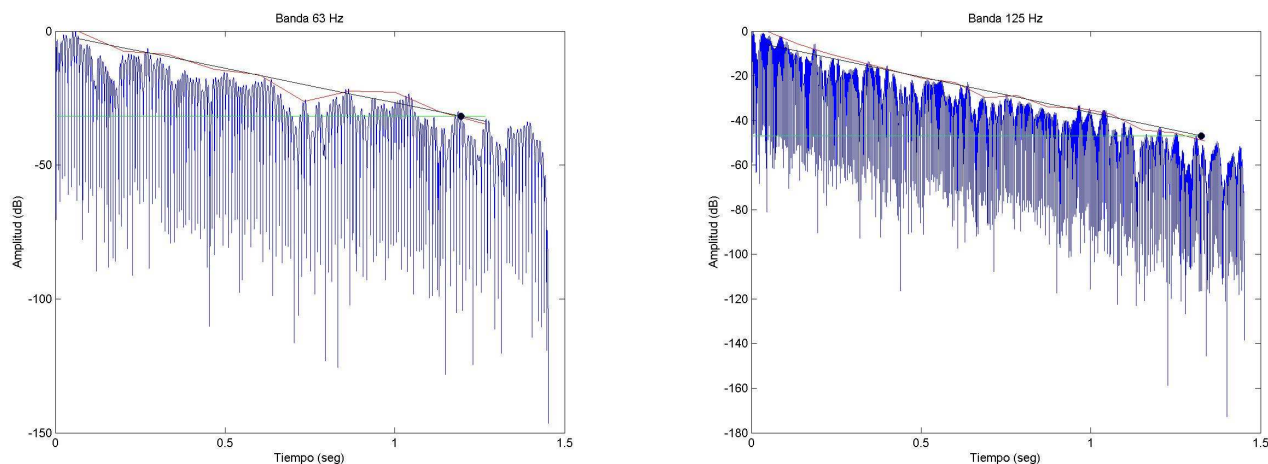


Figura 23. Bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz en escala logarítmica

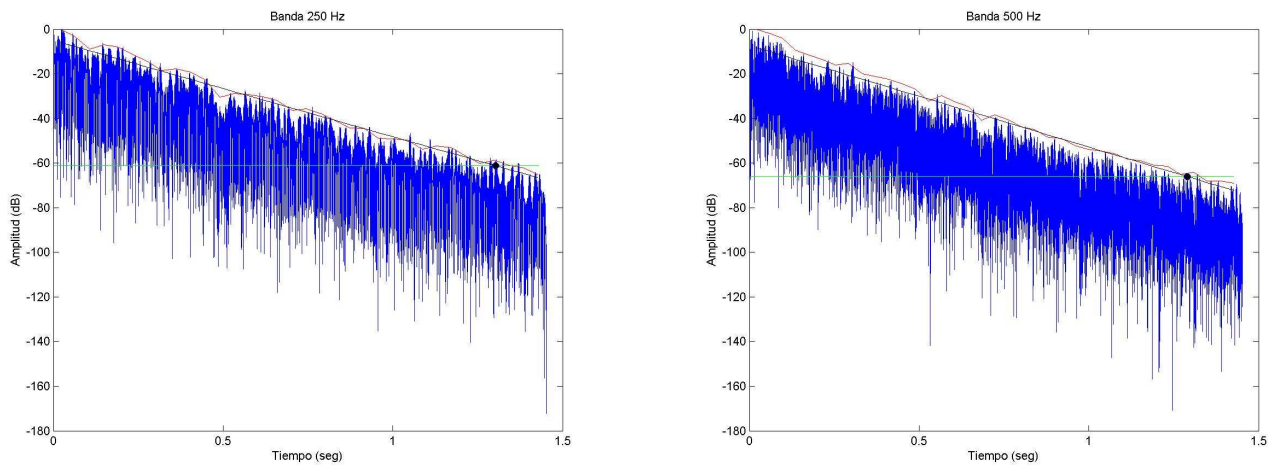


Figura 24. Bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz en escala logarítmica

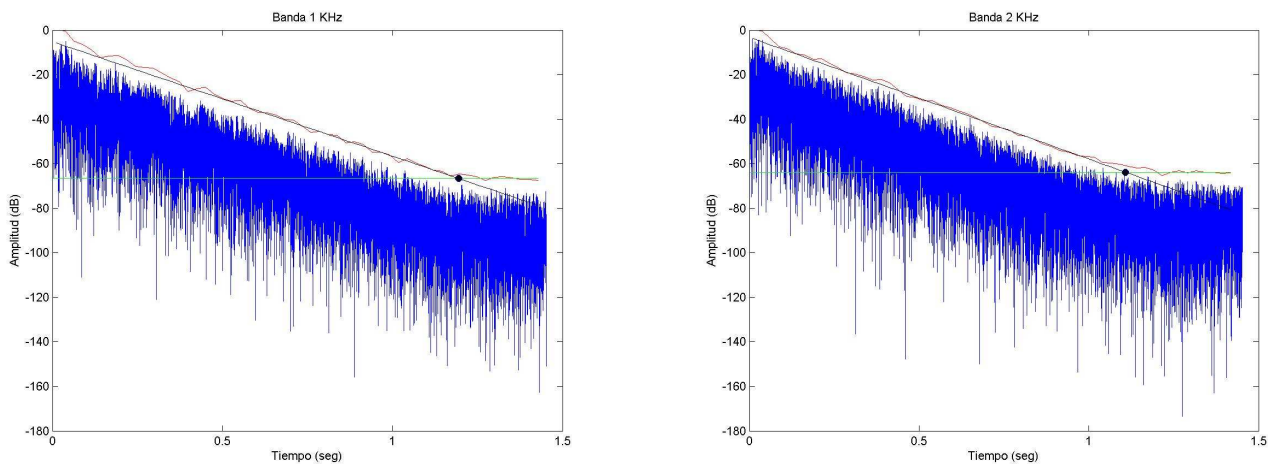


Figura 25. Bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz en escala logarítmica

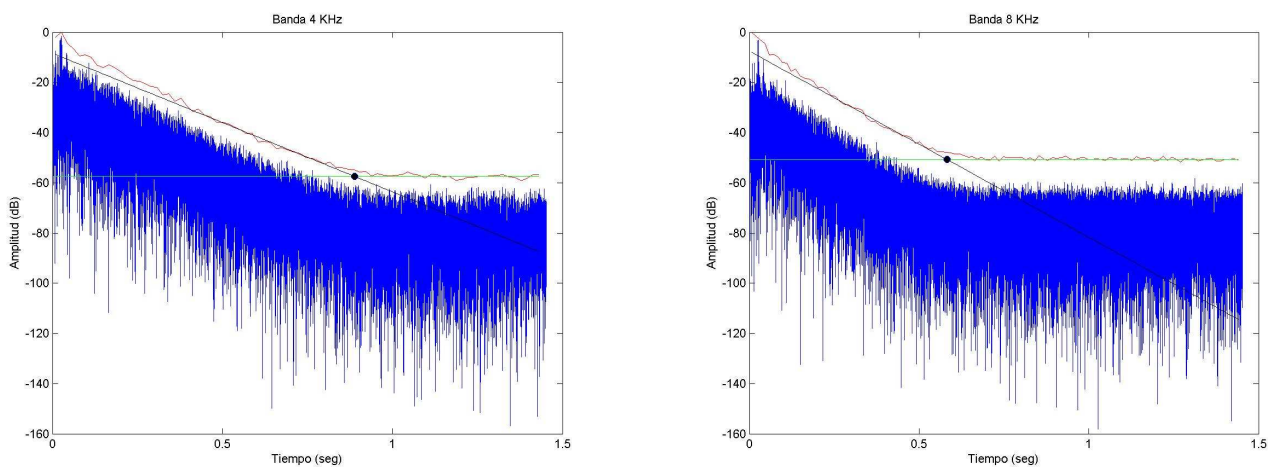


Figura 26. Bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz en escala logarítmica

4.1.7. Curva de decaimiento energético

Tras el hallazgo del punto de truncamiento para cada banda de octava, se calcula la integral de Schroeder. Se consideran como límites de integración el punto de inicio y el punto de truncamiento encontrados.

Esta integral consiste en una integración invertida en el tiempo de la respuesta cuadrática al impulso.

En la siguiente gráfica se muestran las curvas de decaimiento energético para cada banda de octava normalizada respecto al valor máximo de la señal en cada banda:

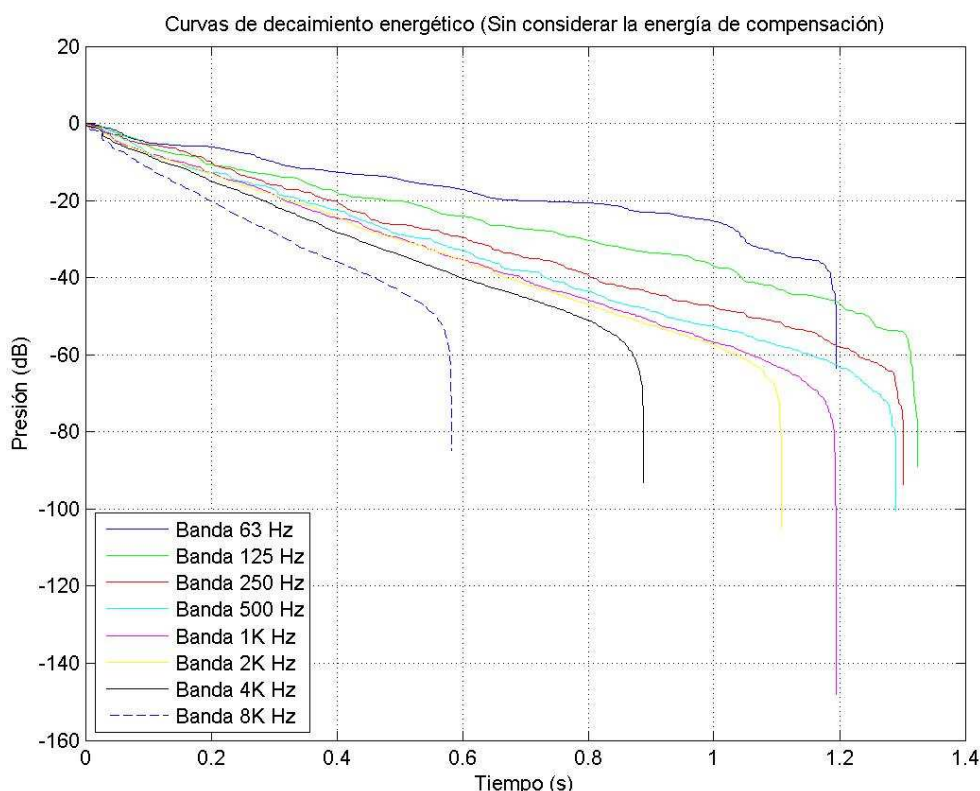


Figura 27. Curvas de decaimiento energético de todas las bandas de octava

Como se puede observar, en el punto de truncamiento se produce una caída brusca de la señal. Cuando calculamos este punto, al restar la influencia del ruido, también perdemos parte de la energía de la señal. Por ello, a la curva de decaimiento debemos añadirle una energía de compensación, para eliminar el “codo” que aparece al final.

4.1.8. Energía de compensación

Considerando el criterio establecido por el documento *Lundeby-Acustica 95* respecto a la energía de compensación (ver apartado 5.4.7. de la presente memoria), se determina la energía de compensación que se añade a la curva de decaimiento energético de cada banda de octava.

A continuación se muestra esta energía en escala lineal para el caso de la banda centrada en 250 Hz. Para la observación del resto de bandas véase el ANEXO C.

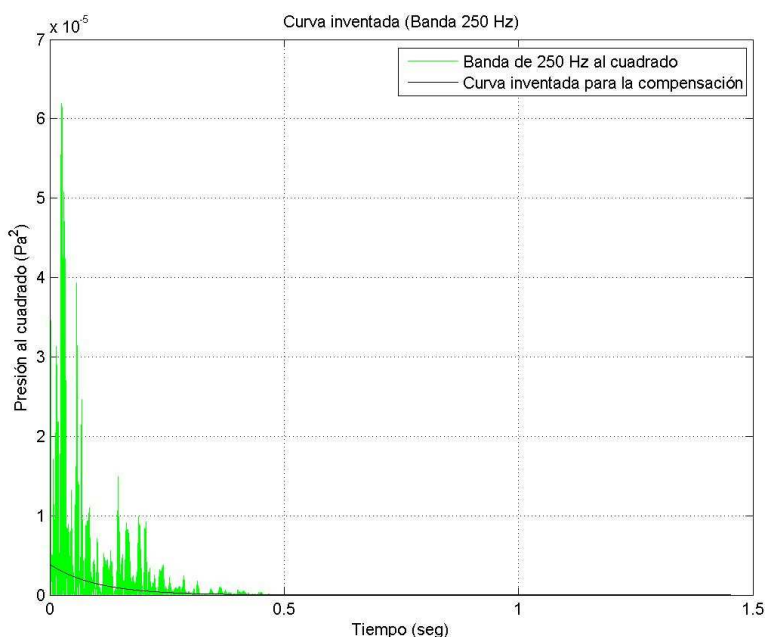


Figura 28. Energía de compensación para la banda centrada en 250 Hz

4.1.9. Curva de decaimiento energético considerando la energía de compensación

A continuación se muestran las curvas de decaimiento energético. Se realiza la comparativa entre la respuesta impulsiva sin truncar, truncada y sin compensación y truncada y con compensación. Se realiza un análisis por bandas de octava, de esta manera queda claramente expuesta la influencia de la energía de compensación que le añadimos a la curva de decaimiento energético de la respuesta impulsiva truncada.

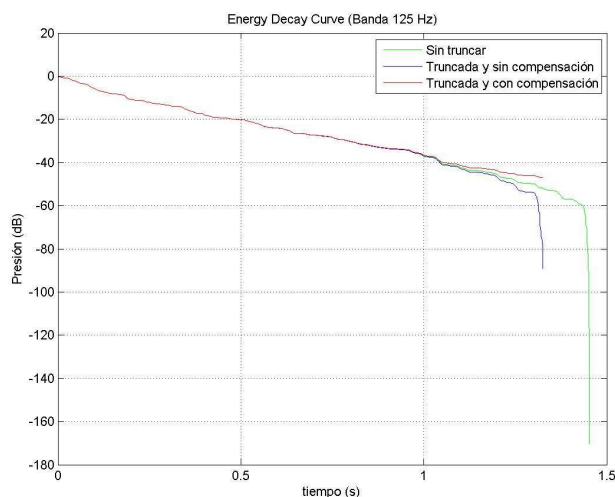
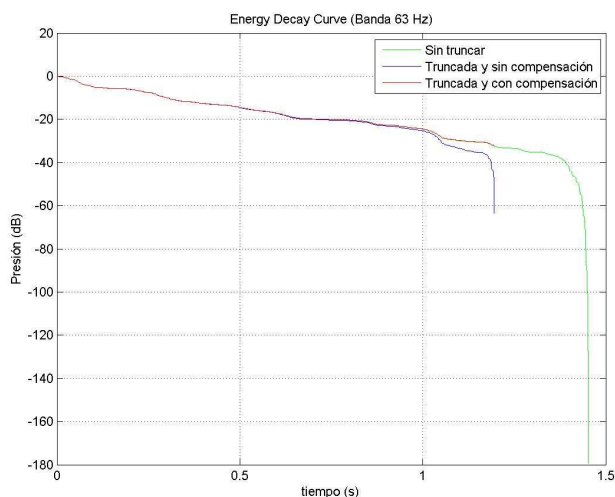


Figura 29. Comparativa bandas 63 Hz y 125 Hz

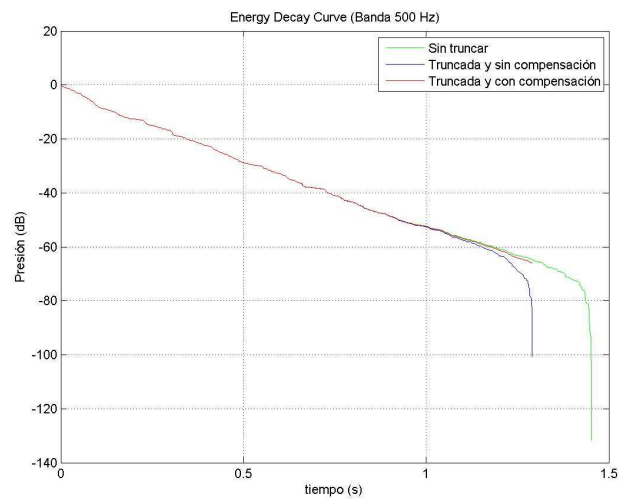
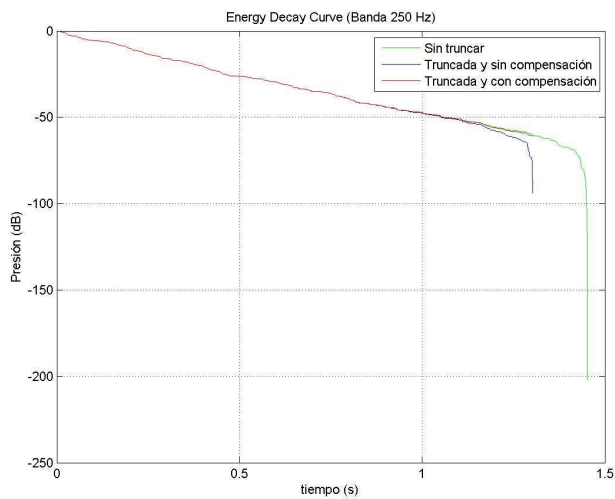


Figura 30. Comparativa bandas 250 Hz y 500 Hz

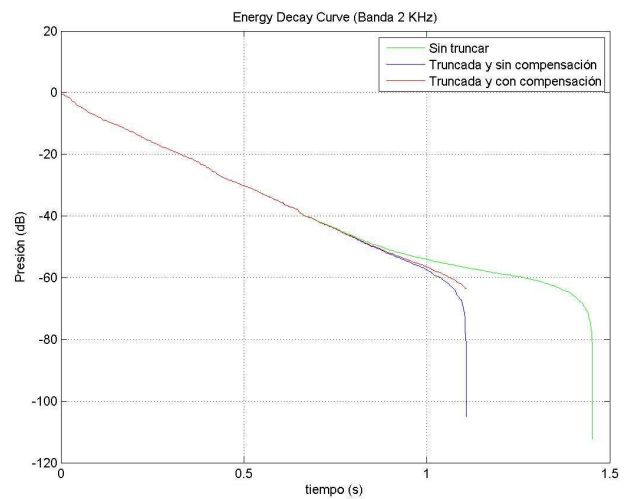
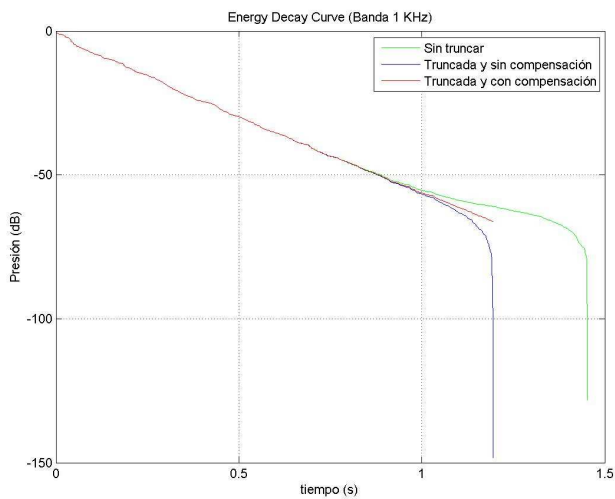


Figura 31. Comparativa bandas 1 KHz y 2 KHz

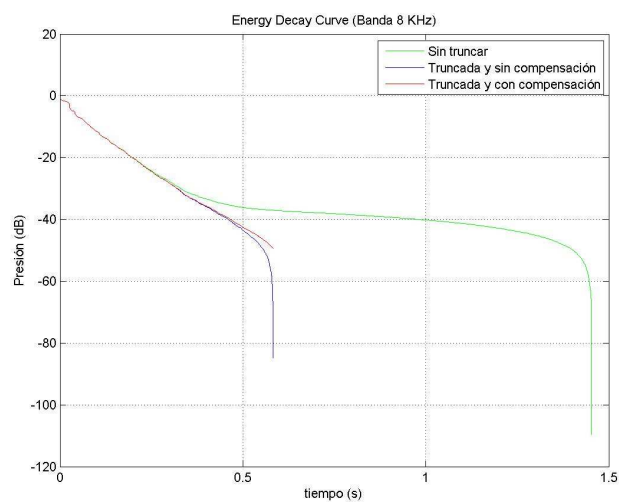
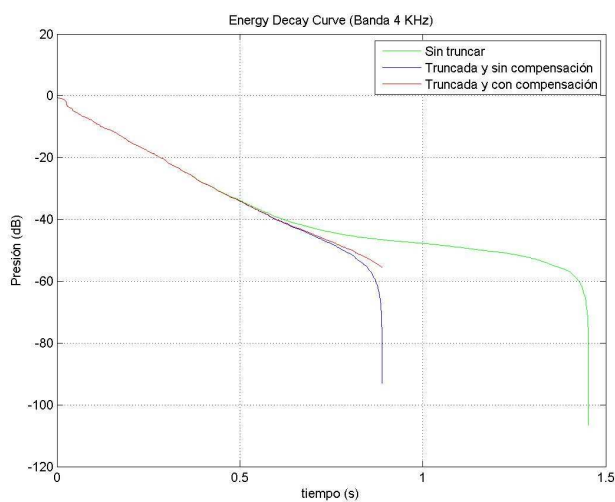


Figura 32. Comparativa bandas 4 KHz y 8KHz

A continuación se muestran estas mismas curvas pero en este caso también se expone la energía de cada banda sin trincar y truncada:

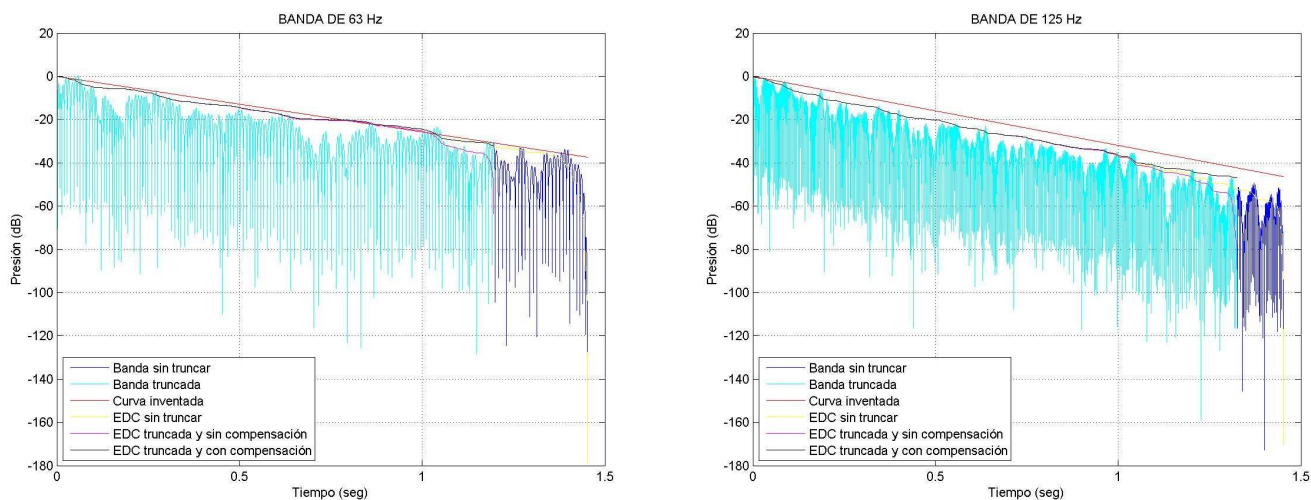


Figura 33. Comparativa banda 63 Hz y 125 Hz

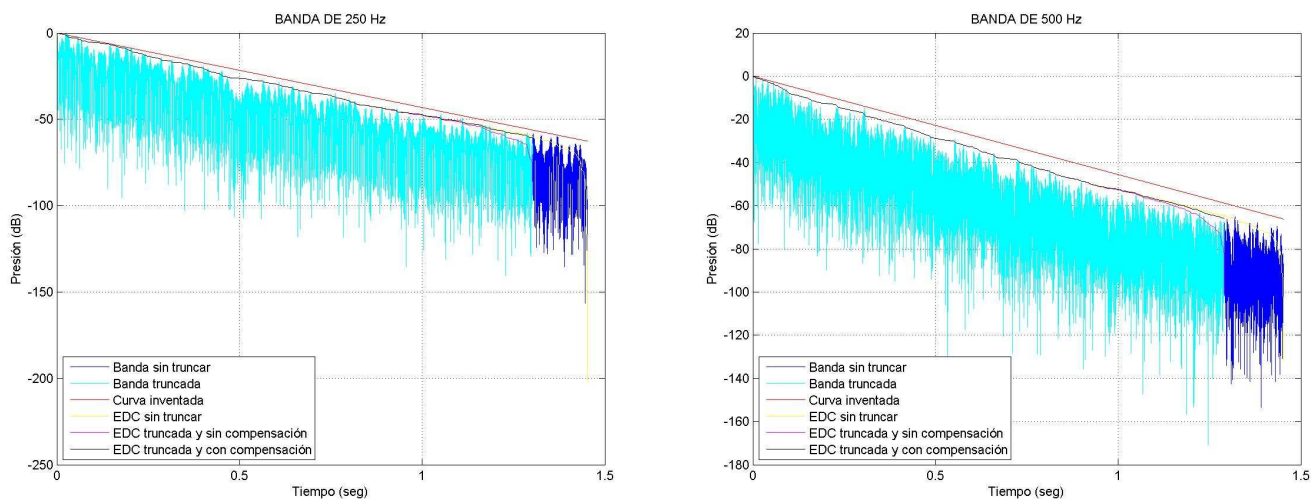


Figura 34. Comparativa banda 250 Hz y 500 Hz

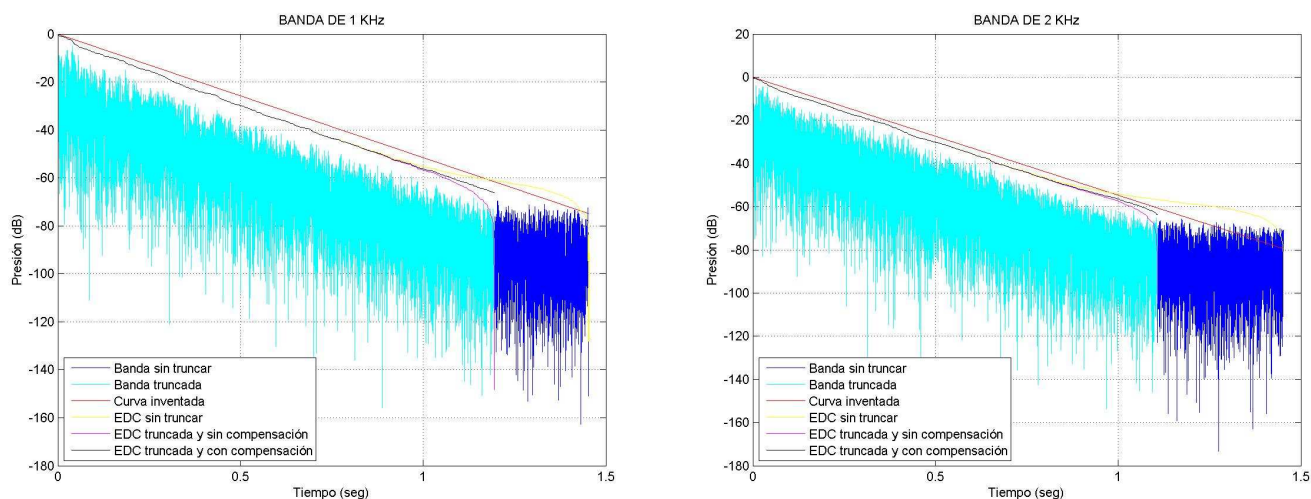


Figura 35. Comparativa banda 1 KHz y 2 KHz

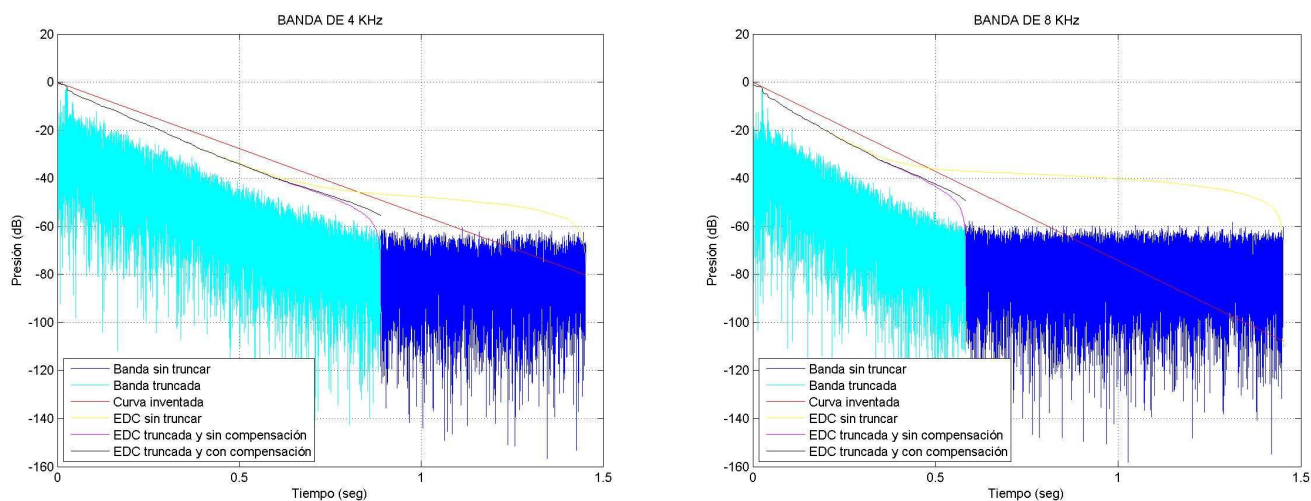


Figura 36. Comparativa banda 4 KHz y 8 KHz

Las curvas de decaimiento energético correspondientes a todas las bandas de octava quedan de la manera que se expone a continuación. Se puede observar como la energía de compensación elimina por completo el “codo” creado por el truncamiento de la respuesta impulsiva.

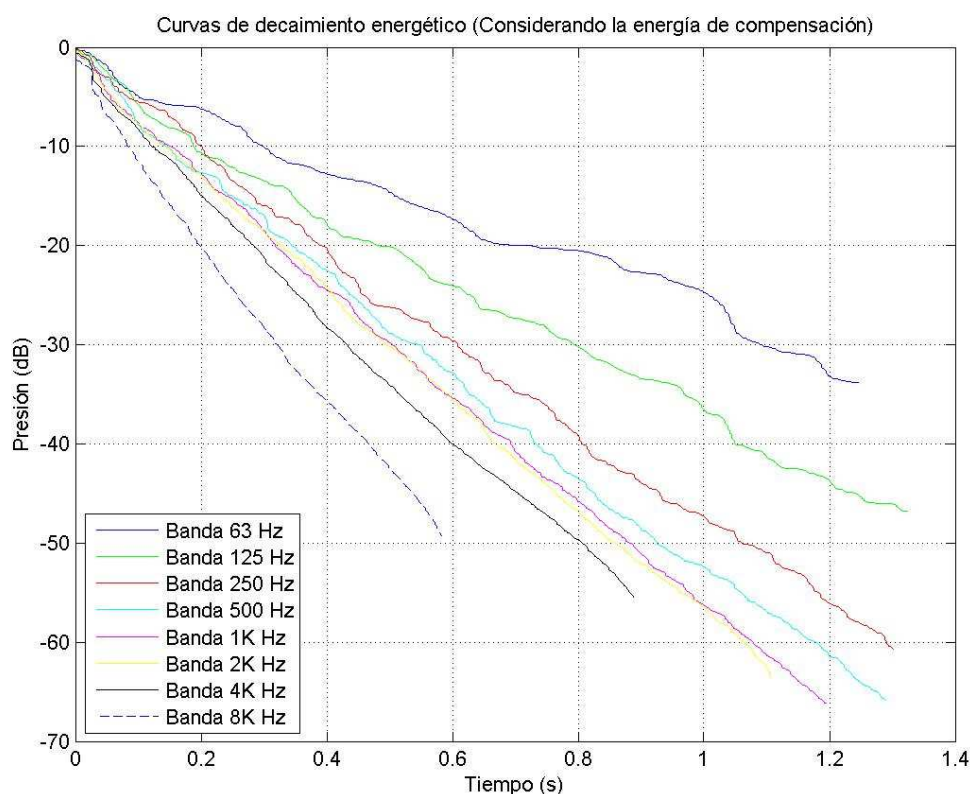


Figura 37. EDC considerando la energía de compensación añadida

4.1.10. Relación señal ruido

Para el cálculo de la relación señal ruido (SNR) se realiza la resta entre el 90% del nivel de la señal en dB's y el nivel de ruido hallado en la última iteración del proceso de truncamiento.

El valor del SNR para cada banda de octava se acepta como óptimo. En la comparativa mostrada en el apartado 4.3. se aprecia claramente como los resultados obtenidos apenas difieren de los proporcionados por WinMLS.

4.1.11. Determinación de los tiempos de reverberación de cada banda de octava

Los puntos de inicio y truncamiento son necesarios para el cálculo de los tiempos de reverberación, ya que son los límites de la integración invertida en el tiempo del cuadrado de la respuesta impulsiva (integral de Schroeder).

Al igual que ocurre en el *Método 2*, para este primer método se trabaja sobre las bandas de octava filtradas, en tal caso, se han calculado el EDT, T_{20} y T_{30} . Los valores obtenidos para cada banda de octava se muestran en la siguiente tabla:

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
EDT/s	2,10	1,11	1,33	0,81	0,89	0,83	0,74	0,52
T_{20} /s	2,58	1,68	1,11	1,19	1,05	1,09	0,92	0,67
T_{30} /s	2,34	1,79	1,20	1,16	1,06	1,06	0,92	0,70

Tabla 1. Tiempos de reverberación

4.1.12. Determinación de los parámetros acústicos de cada banda de octava

En este primer método, el cálculo de los parámetros acústicos es algo diferente que el elaborado en el *Método 2*. En este caso, trabajamos sobre intervalos enventanados de la respuesta impulsiva. Estos posteriormente son filtrados por bandas de octava para realizar el cálculo el cálculo de los parámetros.

Sabiendo que en este método no se considera el retardo que introducen los filtros, a la hora de realizar el enventanado se considera un margen en el intervalo definido. Este margen es la simple adición de 5000 ceros, en muestras, al final de cada intervalo. Tras varias pruebas realizadas se ha optado por esta cantidad, ya que es con la que se consiguen resultados similares al programa WinMLS.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
C₅₀ /dB	-4,2	-1,4	0,08	0,3	2,6	2,3	3,5	5,8
C₈₀/dB	-3,4	1,5	3,04	4,04	5,4	5,4	6,1	8,8
D₅₀/%	30,1	40,9	51,4	51,6	64,7	63,4	69,5	79,3
T_s/s	126,9	87,9	82,3	65,5	59,1	58,3	51,3	35,3

Tabla 2. Parámetros acústicos

4.1.13. Determinación de los parámetros laterales y binaurales de cada banda de octava

Y por último los valores de los parámetros laterales y binaurales se muestran a continuación. Al igual que ocurre con los parámetros anteriores, en este método se trabaja sobre intervalos enventanados y posteriormente filtrados.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
LF	0,03	0,07	0,21	0,21	0,20	0,22	0,25	0,17
LFC	0,15	0,15	0,32	0,25	0,25	0,30	0,27	0,22
IACCA	0,99	0,95	0,85	0,41	0,21	0,39	0,18	0,22
IACCE	0,99	0,96	0,91	0,55	0,28	0,50	0,22	0,29
IACCL	0,88	0,90	0,70	0,31	0,23	0,17	0,14	0,10

Tabla 3. Parámetros acústicos laterales y binaurales

4.2. Método 2

4.2.1. Introducción

A continuación se hace un análisis del *Método 2*. En este caso el estudio no será tan exhaustivo, ya que muchos de los pasos coinciden con los realizados en el *Método 1*. Sin embargo, las diferencias que existen entre ambos métodos serán bien discutidas.

4.2.2. Captura de la respuesta impulsiva

En este punto, la captura de la respuesta impulsiva es única a la hora de aplicar uno u otro método. Esta se puede observar en la Figura 13.

4.2.3. Filtrado por bandas de octava

En este punto es donde encontramos la mayor diferencia entre ambos métodos. Lo primero es realizar un filtrado por bandas de octava y posteriormente es sobre estas bandas de frecuencia donde se calcula el punto de inicio. Para cada banda de octava se obtiene un punto de inicio diferente.

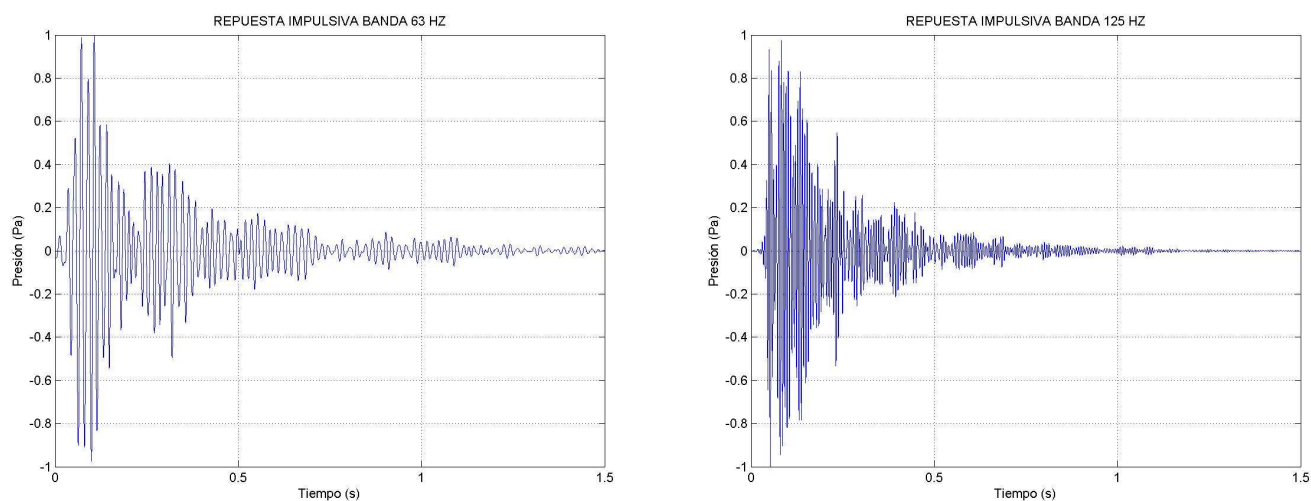
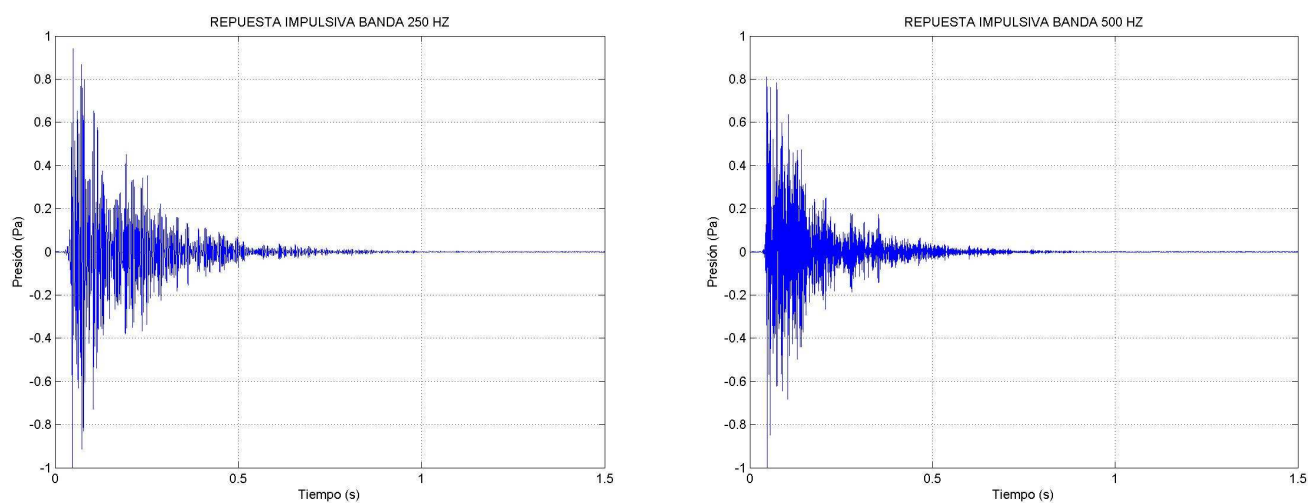
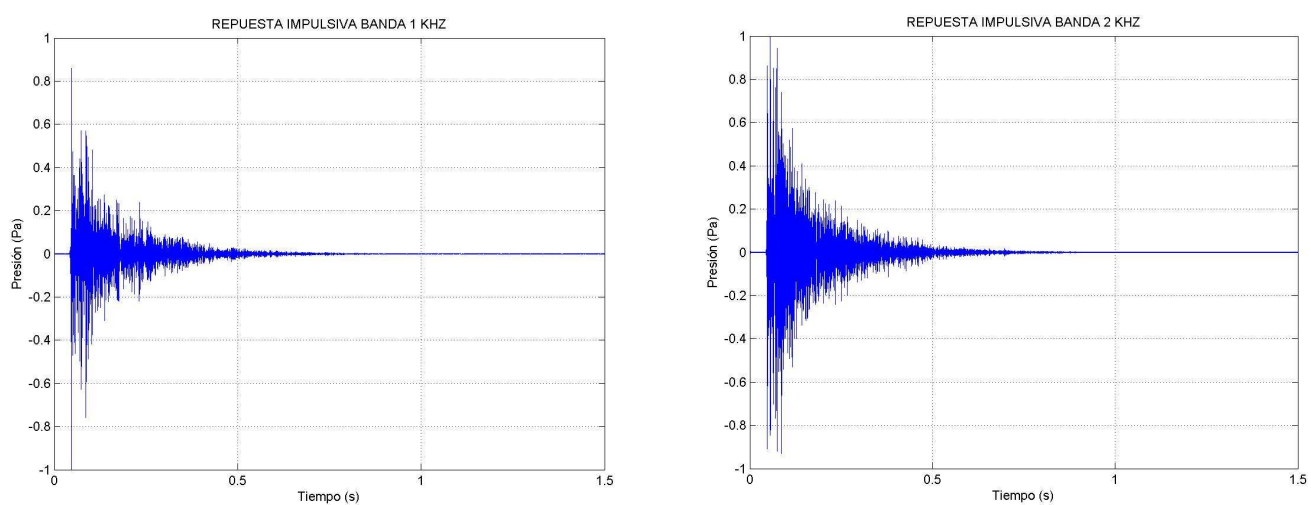
Haciendo alusión a la norma *ISO 3382:2010*, algunos de los parámetros acústicos, requieren un filtrado de la respuesta impulsiva para su estudio. Hay que destacar que se debe conocer el retardo introducido en cada banda a la hora de definir los intervalos necesarios para el cálculo de cada parámetro.

El filtro utilizado para el filtrado por bandas de octava, ha sido un filtro *Butterworth* (ver ANEXO A). Se definen las frecuencias de corte, inferior y superior, para cada banda de octava y se considera un orden de 3 para el filtro en cuestión.

Como observación, se plantea la reducción del orden del filtro. Conociendo el comportamiento de este tipo de filtros, en los cuales a partir de la frecuencia de corte, a mayor orden la pendiente de la caída aumenta, cabe la posibilidad que al usar un orden de 3, el filtro provoque una pérdida de la señal cerca de la frecuencia de corte. Sin embargo, tras verificar el efecto que provoca un filtro de orden 2, la pérdida en el filtro de orden 3 no es muy elevada. Por ello se acepta la utilización de un filtro de orden 3.

La respuesta en amplitud y fase de cada filtro correspondiente a cada banda de octava se puede observar en el ANEXO A.

Tras el filtrado de la señal con este tipo de filtro, la respuesta impulsiva normalizada respecto al valor máximo en esa banda de frecuencia, en escala lineal, queda de la siguiente manera:

**Figura 38. Respuesta impulsiva, bandas de 63 Hz y 125 Hz****Figura 39. Respuesta impulsiva, bandas de 250 Hz y 500 Hz****Figura 40. Respuesta impulsiva, bandas de 1 KHz y 2 KHz**

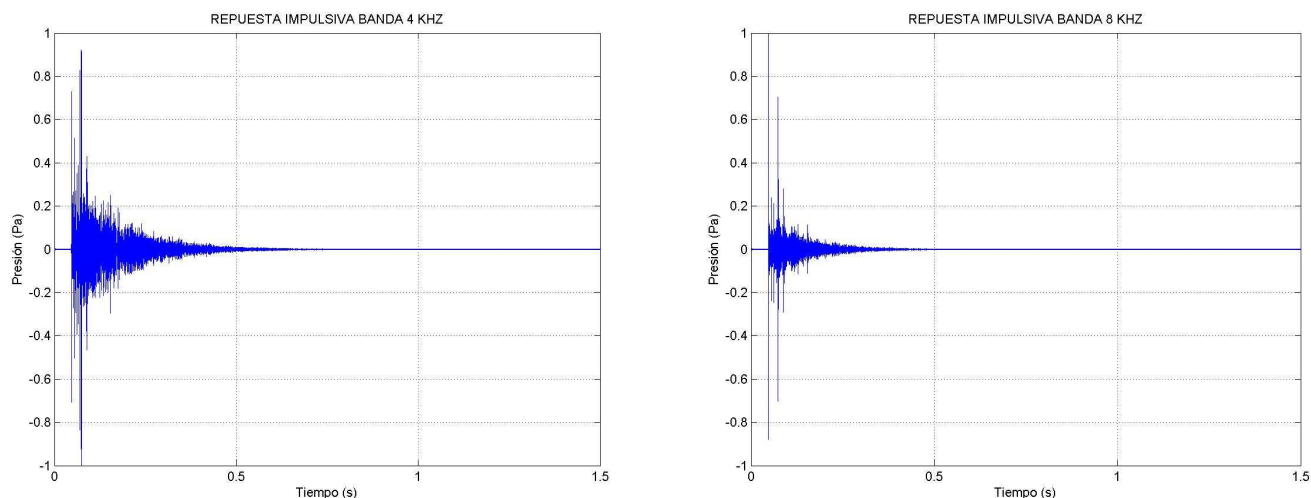


Figura 41. Respuesta impulsiva, bandas de 4 KHz y 8 KHz

4.2.4. Punto de inicio de cada banda de octava

Al igual que en el *Método 1*, para cada banda de octava, existe al comienzo un pequeño intervalo de tiempo donde la señal no toma valor alguno. Se debe eliminar este intervalo y determinar el punto donde la señal comienza realmente.

El criterio utilizado para el cálculo del punto de inicio, es análogo al utilizado para el *Método 1*. Pero en este caso el punto de inicio se determina para cada banda de octava.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos:

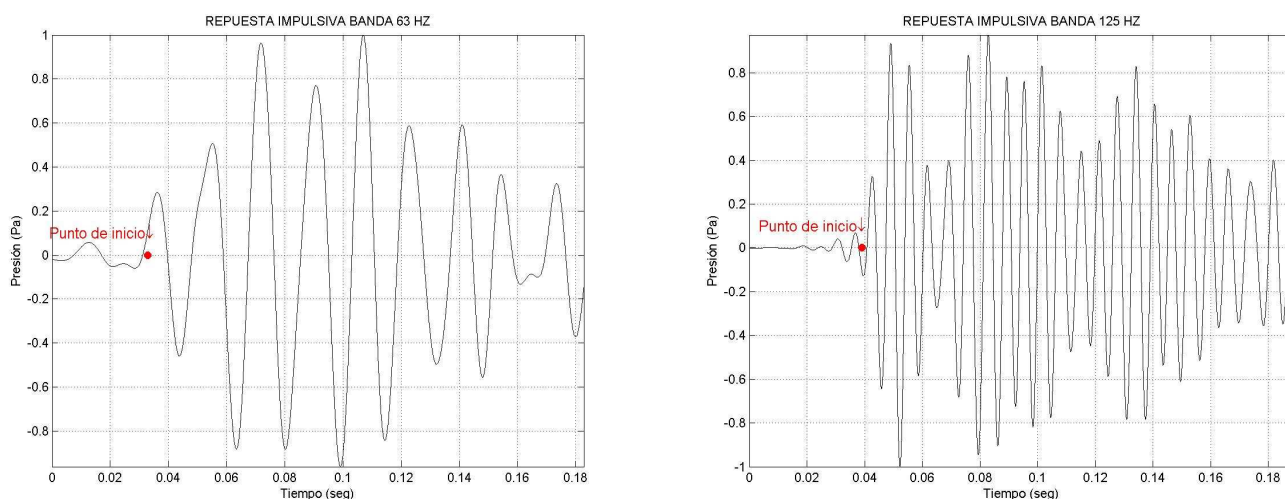


Figura 42. Inicio de las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

Como se puede comprobar, en la zona amplificada, el nivel máximo de la señal ocurre cercano a la muestra 5000 (0.10416 seg), por lo que se corrobora lo mencionado en el apartado 5.4.3., el comienzo de la respuesta impulsiva sucede en una muestra anterior.

Tras la ejecución de la función, para la banda centrada en 63 Hz, el resultado que nos proporciona es que el punto de inicio se sitúa en la muestra 1574, o lo que es lo mismo en el segundo 0.0327916.

Para la banda de octava centrada a la frecuencia de 125 Hz, se determina que el punto de inicio se encuentra en la muestra 1871 (0.03897916 s).

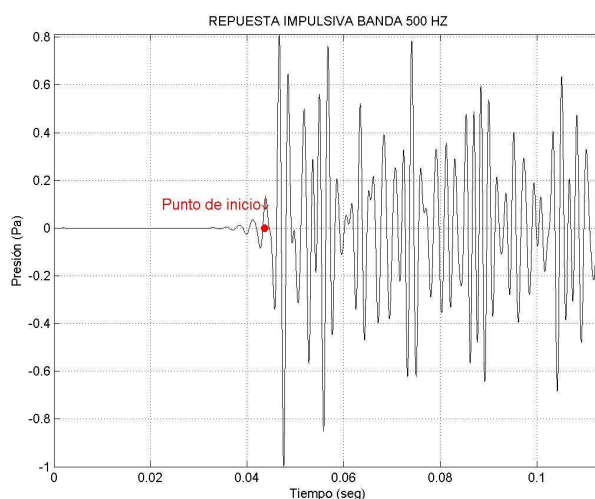
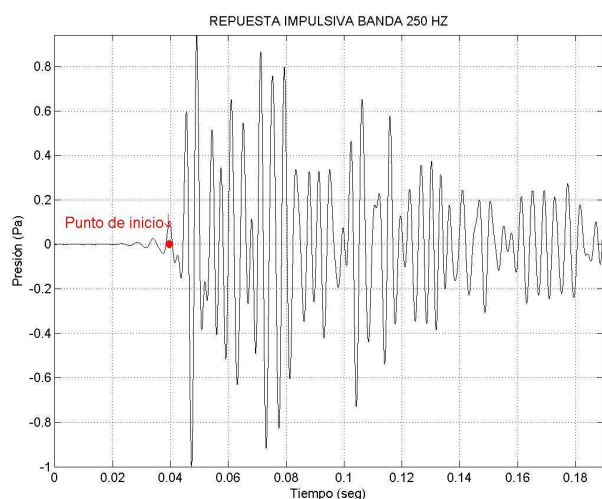


Figura 43. Inicio de la bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

Para la banda centrada en 250 Hz, la función determina que el punto de inicio se localiza en la muestra 1896 (0.0395 s).

Para la banda centrada en 500 Hz, el comienzo de la respuesta impulsiva se halla en la muestra 2091 (0.0435625 s).

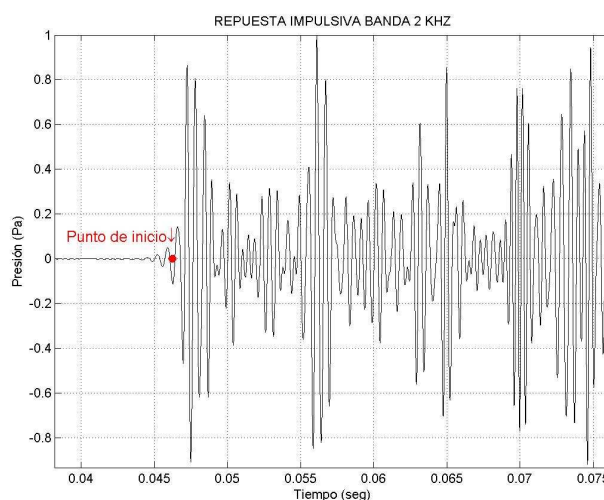
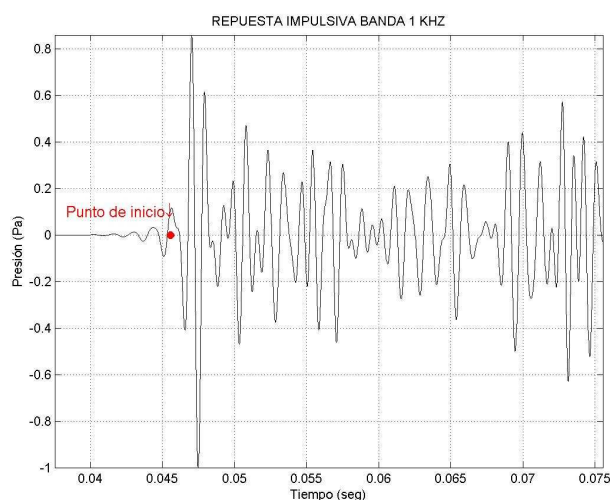


Figura 44. Inicio de las bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz

Para la banda centrada en 1 KHz, se determina que el punto de inicio se encuentra en la muestra 2186 (0.0455416 s).

Para la banda centrada en 2 KHz la función precisa que el comienzo ocurre en la muestra número 2218 (0.0462083 s).

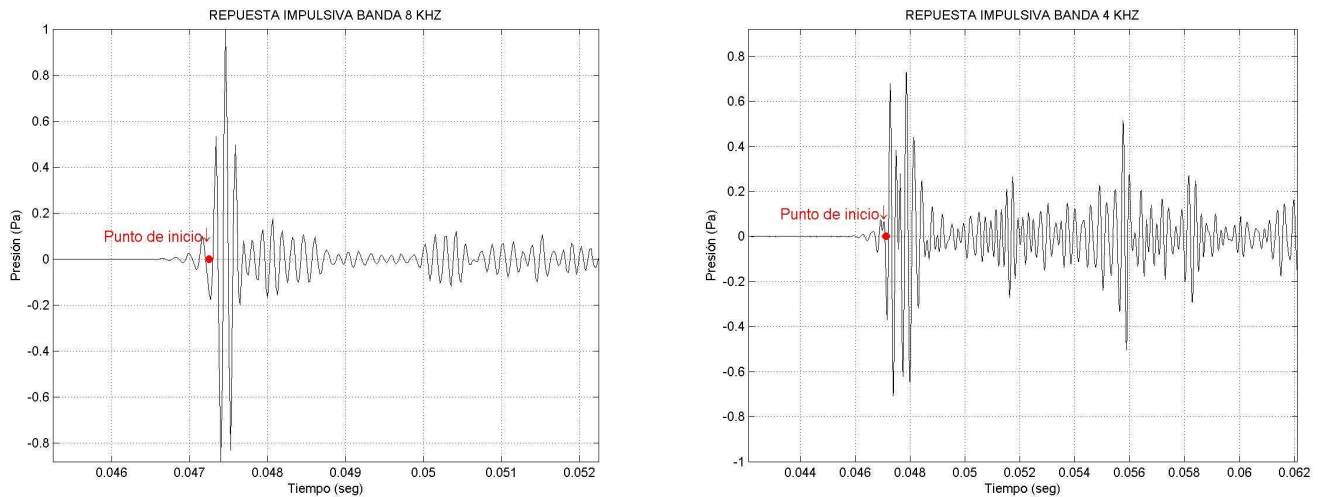


Figura 45. Inicio de las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz

Para esta banda de octava centrada en 4 KHz, el punto de inicio se define en la muestra número 2262 (0.047125 s).

Y para el último caso, banda de octava centrada a 8 KHz, la muestra es la número 2268 (0.04725 s).

4.2.5. Punto de truncamiento de cada banda de octava

Al igual que en el *Método 1*, el siguiente procedimiento es el truncamiento de cada banda de octava.

El proceso es análogo, por lo que en este apartado no describe cada paso por separado. Sin embargo, cabe destacar que encontramos una diferencia, la localización del punto de inicio. Como ya se sabe, para el primer método el punto de inicio se define sobre la respuesta impulsiva en banda ancha, pero para el *Método 2* se localiza para cada banda de octava.

Analizados los resultados obtenidos sobre la localización de este punto y dándolo como óptimo, no resulta viable volver a analizar todo el proceso. Por ello, se mostrarán únicamente las gráficas que muestran la media, el nivel de ruido, la regresión lineal y el punto de truncamiento hallado para cada banda de octava.

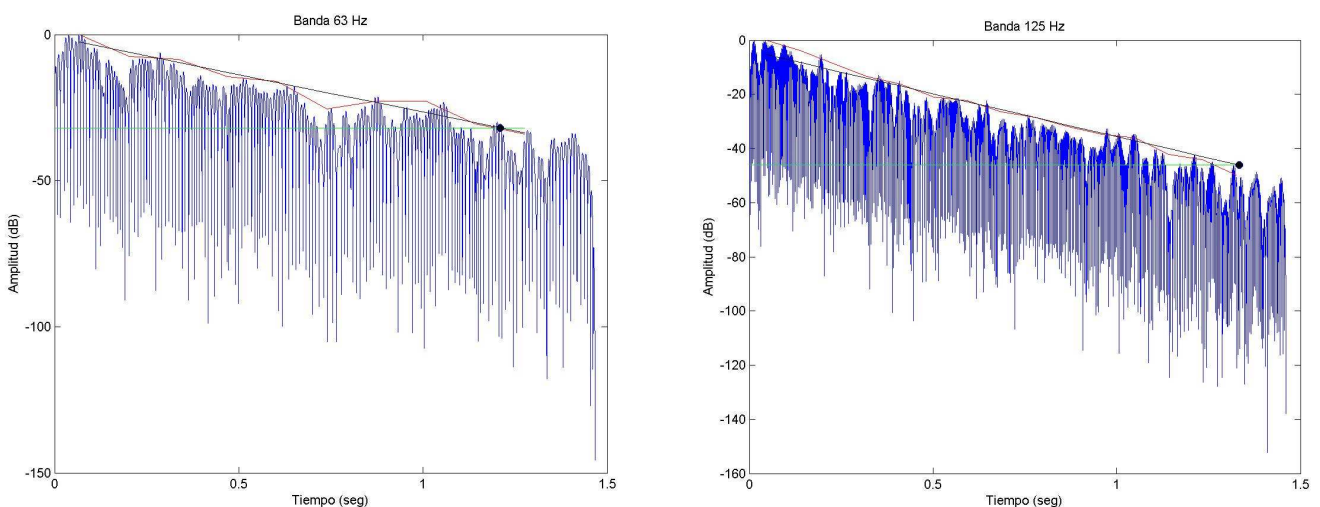


Figura 46. Bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz en escala logarítmica

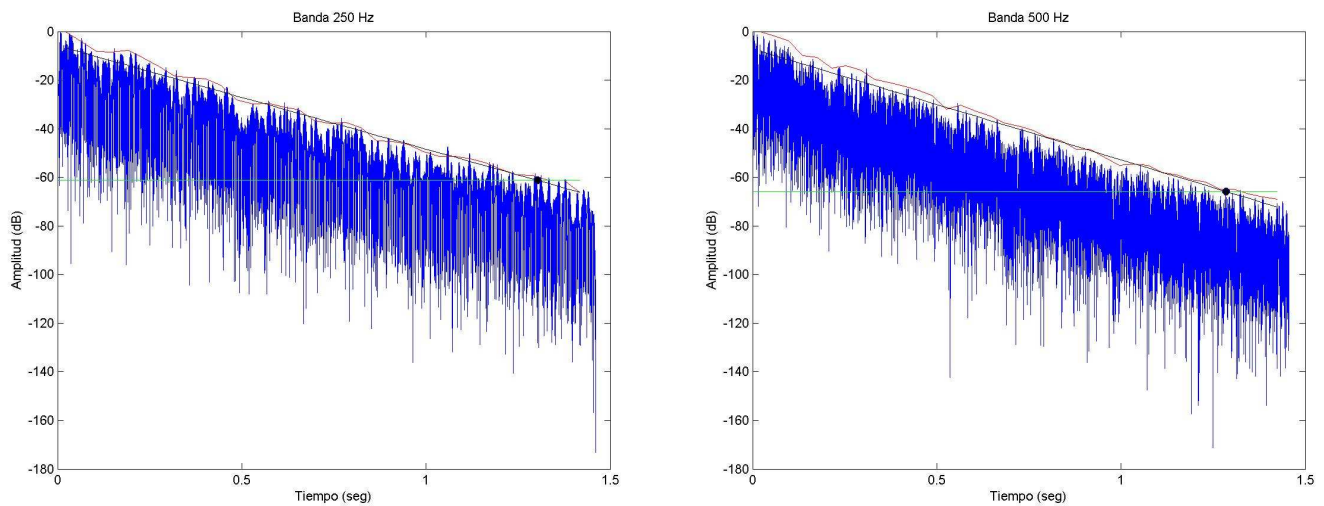


Figura 47. Bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz en escala logarítmica

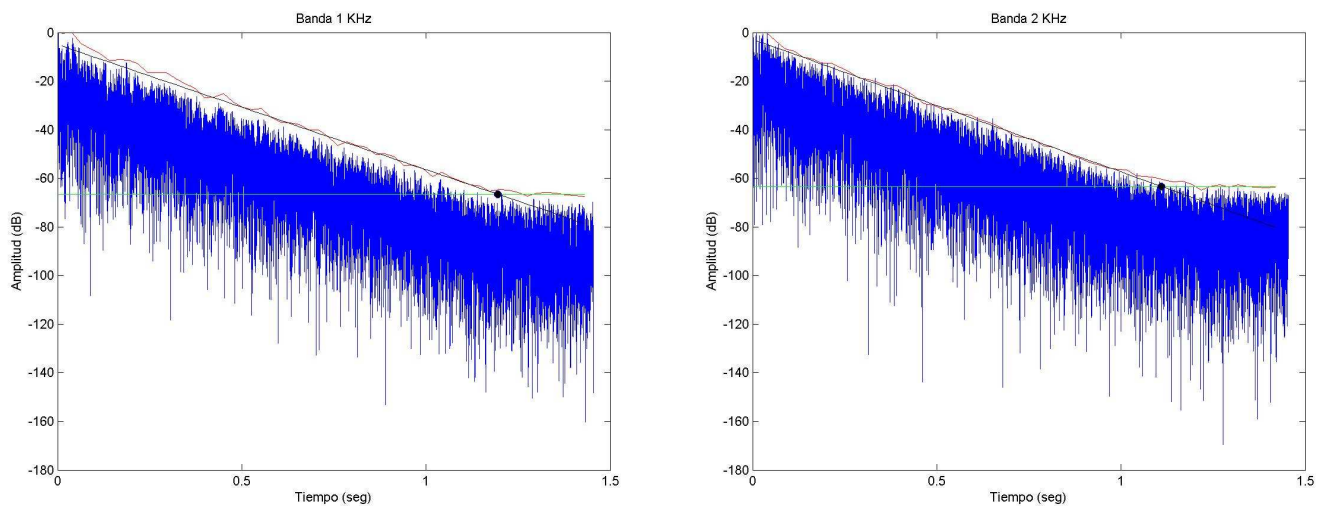


Figura 48. Bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz en escala logarítmica

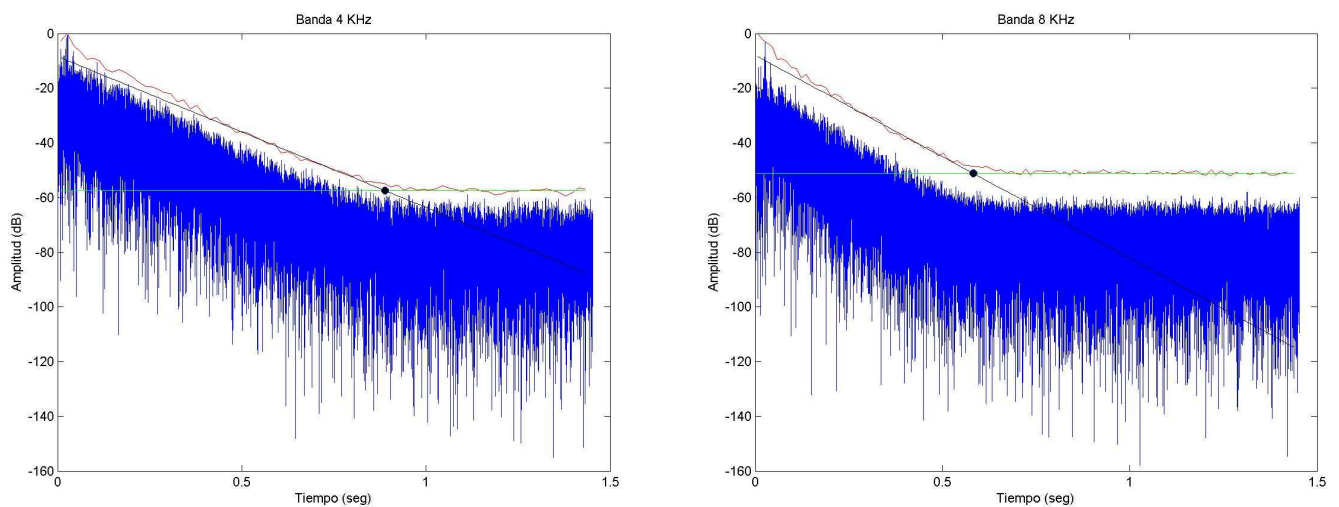


Figura 49. Bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz en escala logarítmica

4.2.6. Curva de decaimiento energético

Obteniendo un resultado similar que el conseguido en el *Método 1*, a continuación se observan las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada.

Se contempla claramente el “codo” producido por el proceso de truncamiento.

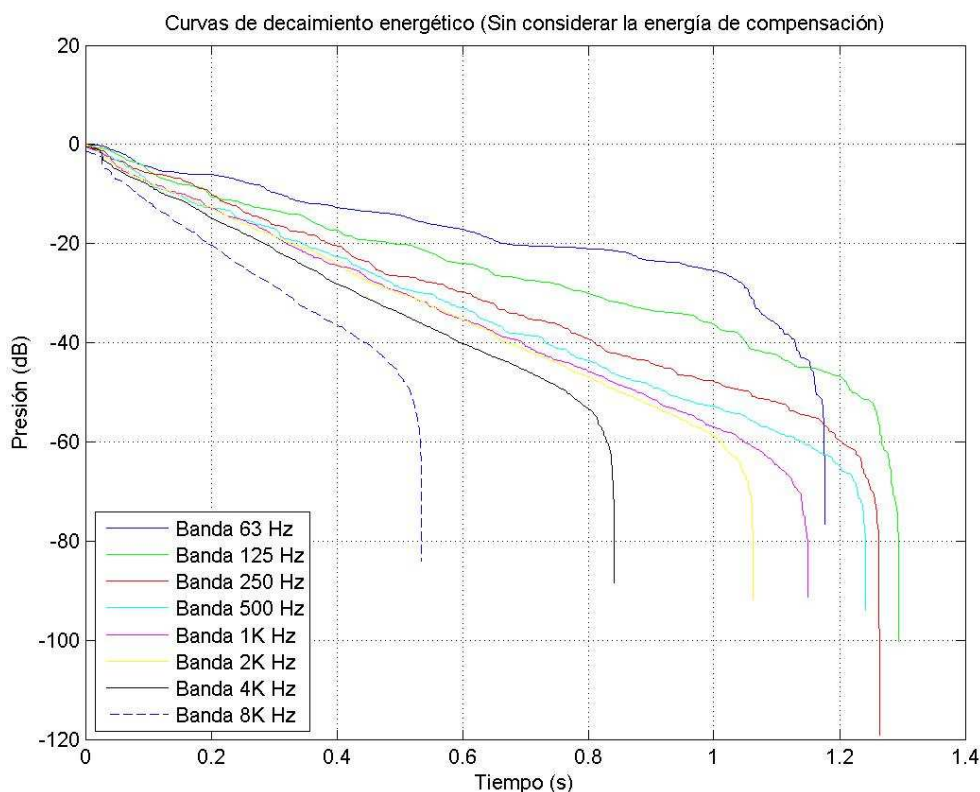


Figura 50. Curvas de decaimiento energética de todas las bandas de octava

4.2.7. Curva de decaimiento energético considerando la energía de compensación

Al igual que en el *Método 1*, tras calcular la energía de compensación y sumársela a la energía de la curva EDC, calculada sin considerar la compensación, se obtienen las siguientes curvas de decaimiento energético. Se observa como se elimina la caída brusca producida por el truncamiento de la señal.

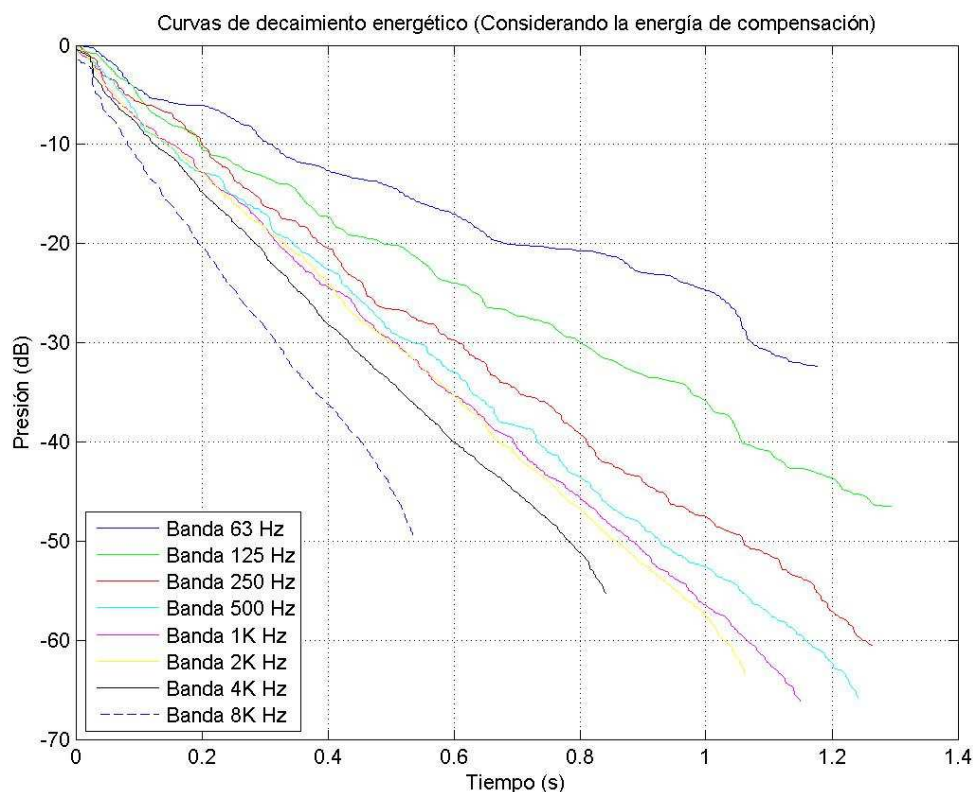


Figura 51. EDC considerando la energía de compensación añadida

4.2.8. Relación señal ruido

Los valores de las relaciones señal ruido de cada banda se observan en el apartado 4.3.

4.2.9. Determinación de los tiempos de reverberación de cada banda de octava

Como ya se ha mencionado, los puntos de inicio y truncamiento son necesarios para el cálculo de los tiempos de reverberación, ya que son los límites de la integración invertida en el tiempo de los cuadrados de la respuesta impulsiva (integral de Schroeder).

Los resultados en este caso se muestran en la siguiente gráfica:

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
EDT	2,04	1,12	1,32	0,81	0,89	0,84	0,75	0,51
T ₂₀	2,54	1,68	1,13	1,19	1,05	1,09	0,92	0,67
T ₃₀	2,42	1,79	1,20	1,16	1,06	1,06	0,91	0,69

Tabla 4. Tiempos de reverberación

4.2.10. Determinación de los parámetros acústicos de cada banda de octava

Los valores de los parámetros acústicos se observan en la siguiente tabla:

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
C₅₀	-1,9	-1,2	0,6	0,5	2,5	2,1	3,3	6,1
C₈₀	2,3	1,5	3,3	4,0	5,2	5,2	5,9	9,02
D₅₀	38,9	42,8	53,5	53,2	64,4	61,7	68,5	80,1
T_s	135,5	95,3	82,4	66,2	61,1	61,1	52,9	34,2

Tabla 5. Parámetros acústicos

4.2.11. Determinación de los parámetros laterales y binaurales de cada banda de octava

Y por último el valor de los parámetros laterales y binaurales se observan en la siguiente tabla:

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
LF	0,02	0,07	0,21	0,18	0,21	0,21	0,27	0,16
LFC	0,09	0,21	0,26	0,24	0,26	0,29	0,30	0,21
IACCA	0,98	0,92	0,80	0,43	0,29	0,37	0,19	0,20
IACCE	0,99	0,92	0,86	0,56	0,39	0,47	0,23	0,26
IACCL	0,97	0,94	0,68	0,35	0,22	0,18	0,14	0,09

Tabla 6. Parámetros acústicos laterales y binaurales

4.3. Comparativa de los métodos con el WinMLS

Se analizan los resultados obtenidos para ambos métodos, al tiempo que se realiza la comparación con el programa *WinMLS*.

EDT

En este caso ambos métodos, al igual que el *WinMLS*, aportan los mismos resultados. En la siguiente gráfica comparativa se aprecia claramente como los valores apenas difieren.

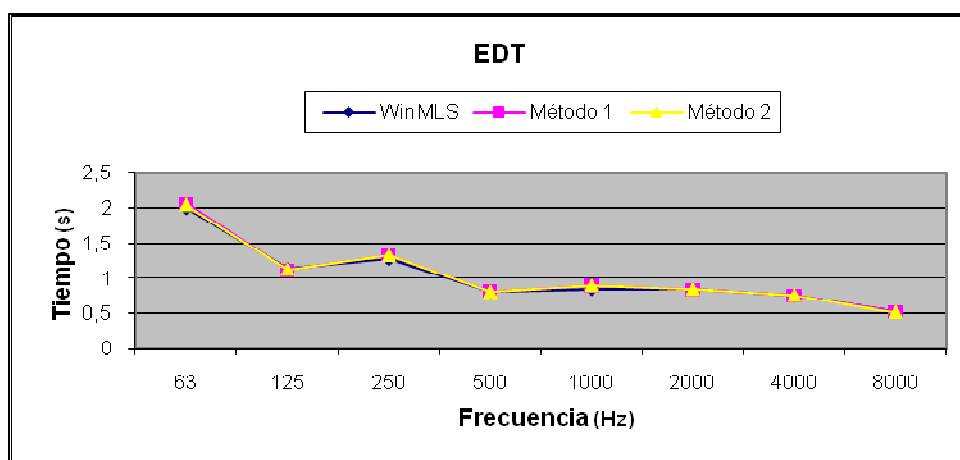


Figura 52. Comparativa EDT

T20

Al igual que en el caso anterior ambos métodos y el *WinMLS* proporcionan los mismos resultado.

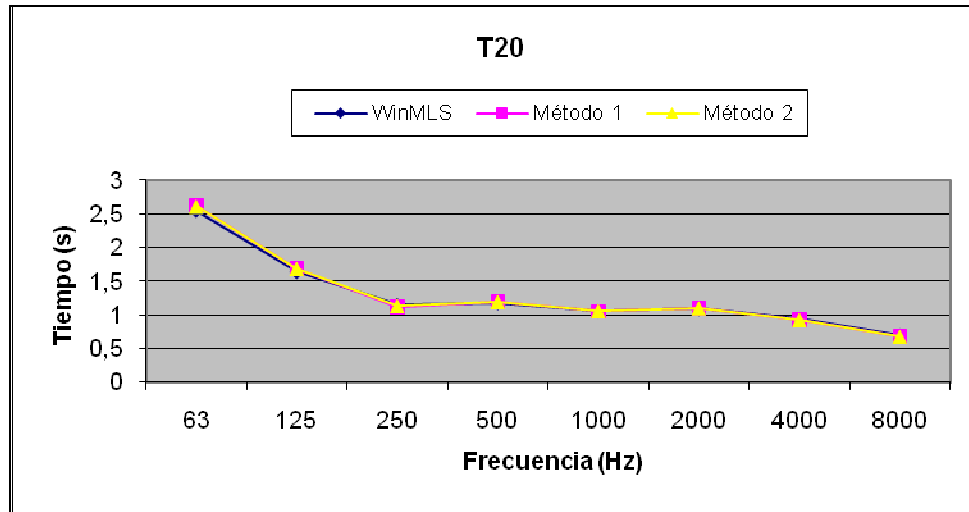


Figura 53. Comparativa T20

T30

Ambos métodos proporcionan un valor menor en la banda de octava centrada en 63 Hz. Sin embargo, la diferencia se considera mínima, siendo la del *Método 2* algo mayor.

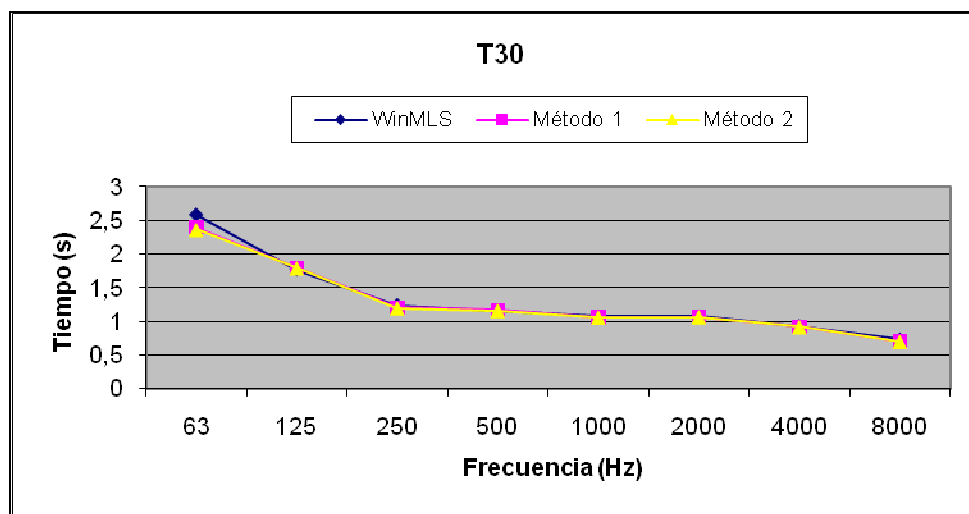
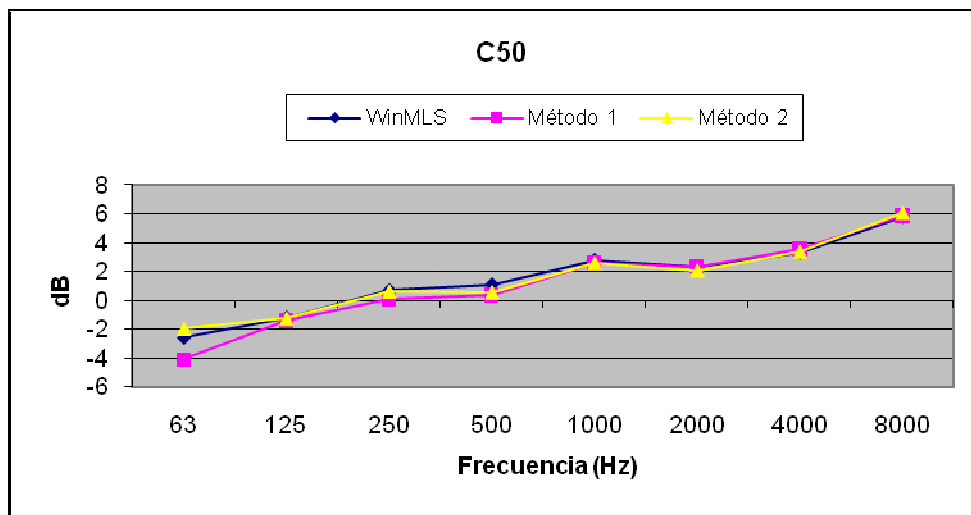


Figura 54. Comparativa T30

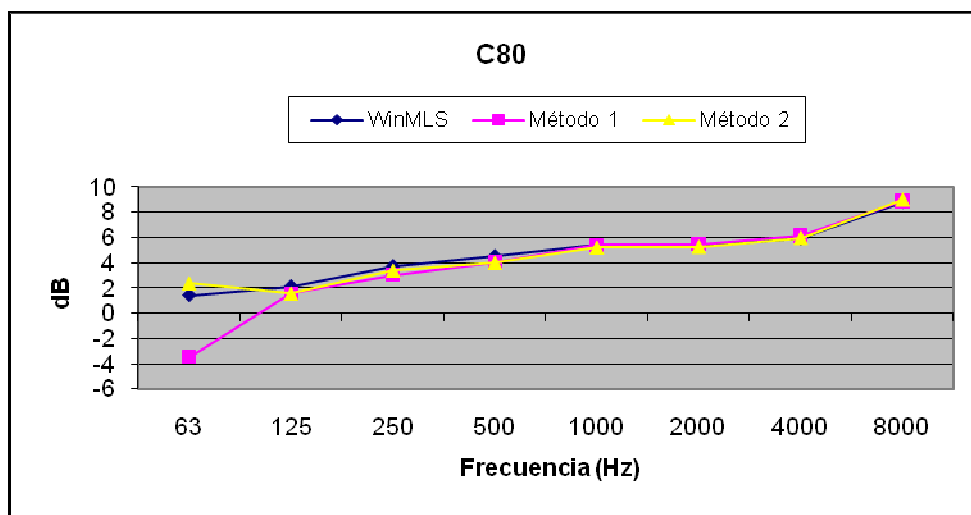
C₅₀

En este caso es el *Método 1* el cual obtiene un valor menor en la banda centrada en 63 Hz. Apartir de aquí se puede deducir que el programa *WinMLS* toma el *Método 2* como criterio. Las diferencias son mucho menores entre estos dos.

**Figura 55. Comparativa C₅₀****C₈₀**

Llegados a este punto, se puede subrayar lo dicho anteriormente. El *WinMLS* sigue el criterio de realizar primero el filtrado por bandas de octava y posteriormente el enventanado.

Observando la comparativa, es el *Método 1* el que consigue resultados más coherentes para el caso que estamos analizando. Si se observan los valores del T30, donde se consiguen valores más altos (banda de 63 Hz) para el C₈₀ se deberían coseguir valores más bajos. Como se aprecia en la Figura 56 es el *Método 1* el que lo cumple.

**Figura 56. Comparativa C₈₀**

D₅₀

Conociendo la definición del D₅₀ y sabiendo que esta estrechamente relacionado con el parámetro C₅₀, se observa claramente, como en este caso también, en la banda centrada en 63 Hz, el *Método 1* proporciona un valor menor que el presentado por el *Método 2* y *WinMLS*.

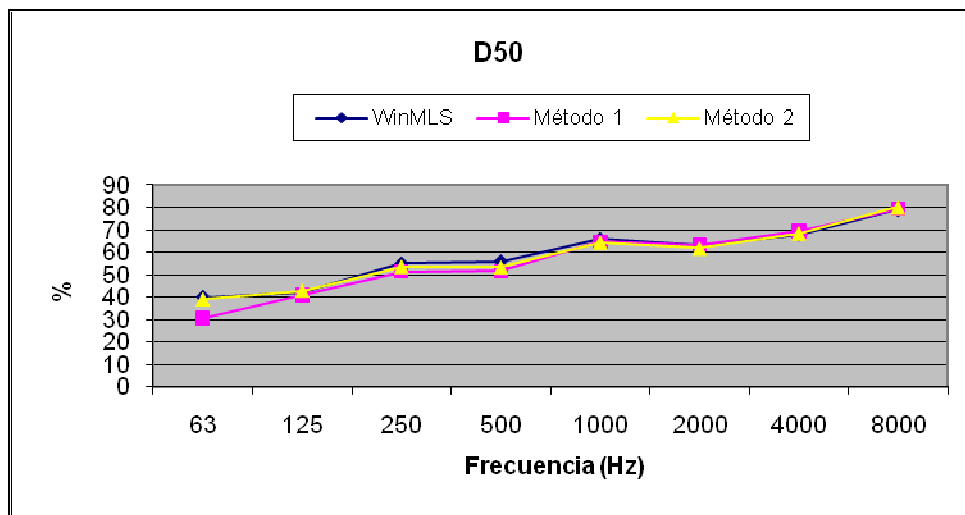


Figura 57. Comparativa D50

T_s

Para el caso del tiempo central, como sigue ocurriendo en los casos anteriores, es el *Método 1*, el cual ofrece una estimación menor del valor en las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz. Considerando que el *WinMLS* realiza sus cálculos mediante el *Método 2*, entre estos dos no existen diferencias apreciables.

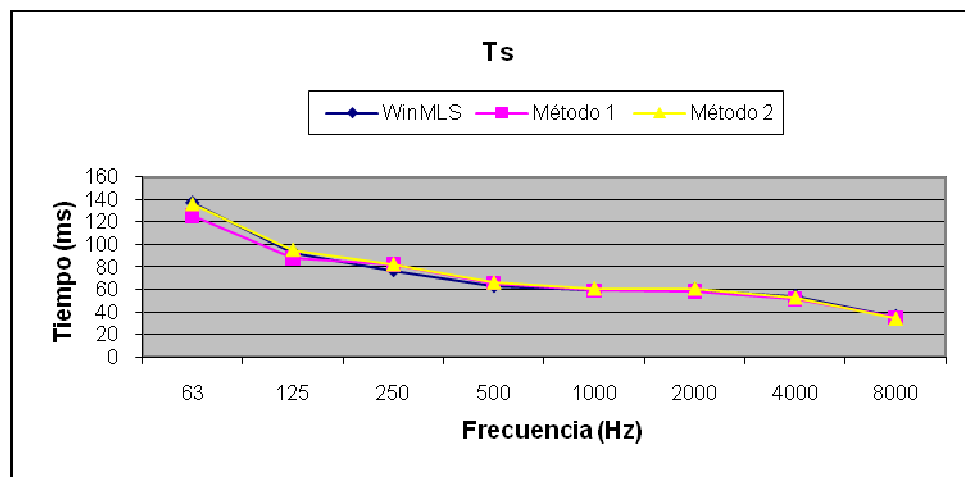


Figura 58. Comparativa Ts

LF

El cálculo de la fracción de energía resulta menos preciso. Ocurre que en varias bandas de octava ambos métodos proporcionan resultados más dispares frente a los ofrecidos por el programa *WinMLS*. Sin embargo, seguimos considerando que el *WinMLS* sigue el *Método 2*.

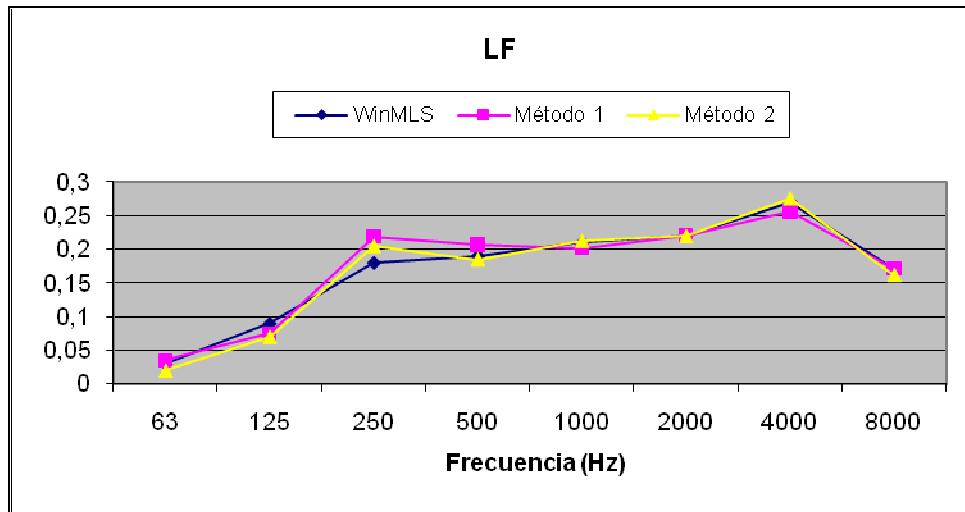


Figura 59. Comparativa LF

LFC

En la siguiente gráfica se observa claramente como los valores del *Método 2* son muy similares a los aportados por *WinMLS*.

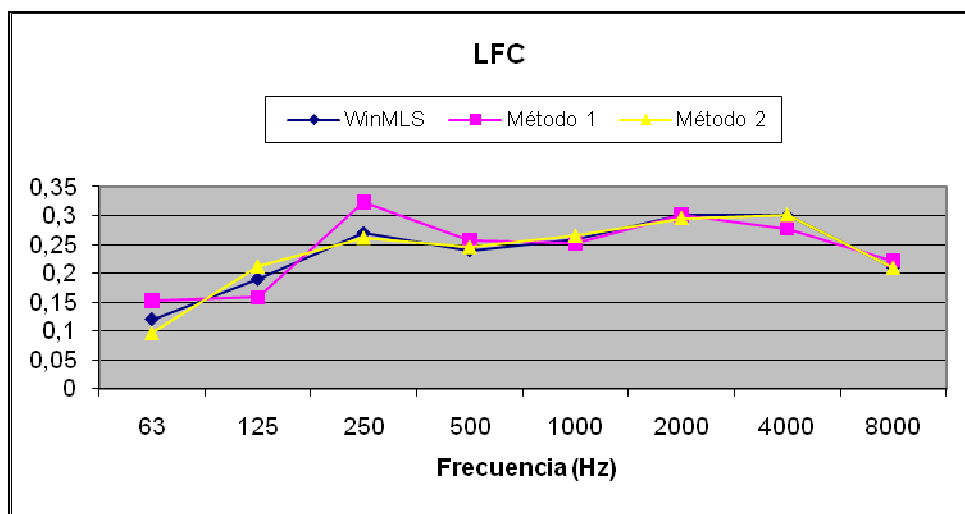


Figura 60. Comparativa LFC

IACCA

Para este caso las diferencias entre métodos son mínimas.

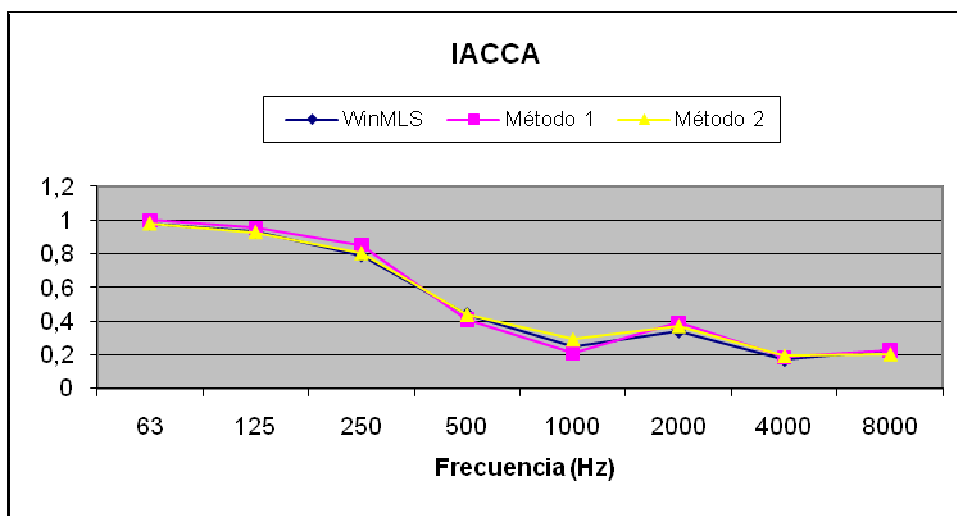


Figura 61. Comparativa IACCA

IACCE

Como viene ocurriendo, las diferencias entre el *Método 2* y *WinMLS* son mínimas. Encontramos ligeras variaciones con respecto al *Método 1*.

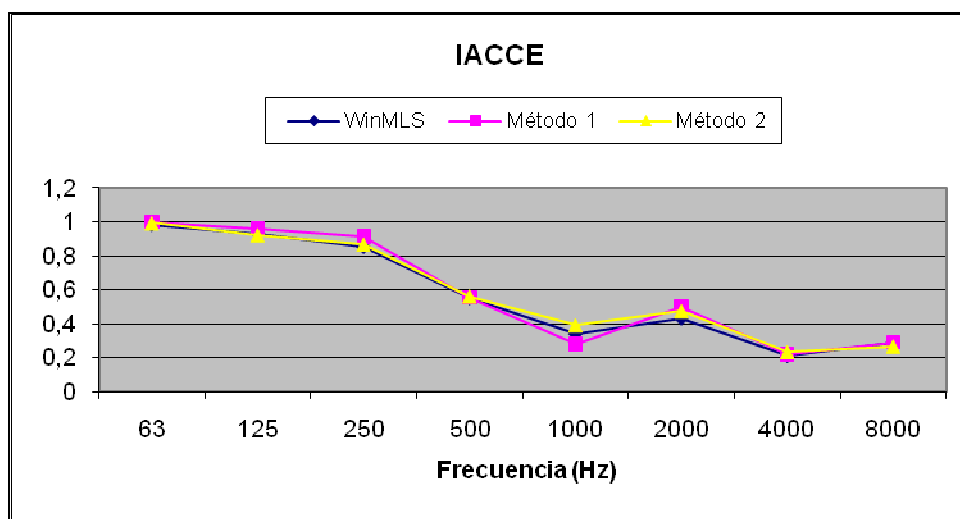


Figura 62. Comparativa IACCE

IACCL

Y como parámetro final, el IACCL, tal y como se observa en la gráfica siguiente, son en las bandas de 500 Hz y 1 KHz donde se encuentran las mayores diferencias, ambos métodos estiman un valor mayor. Sin embargo, para el resto de bandas de octava los valores son muy similares.

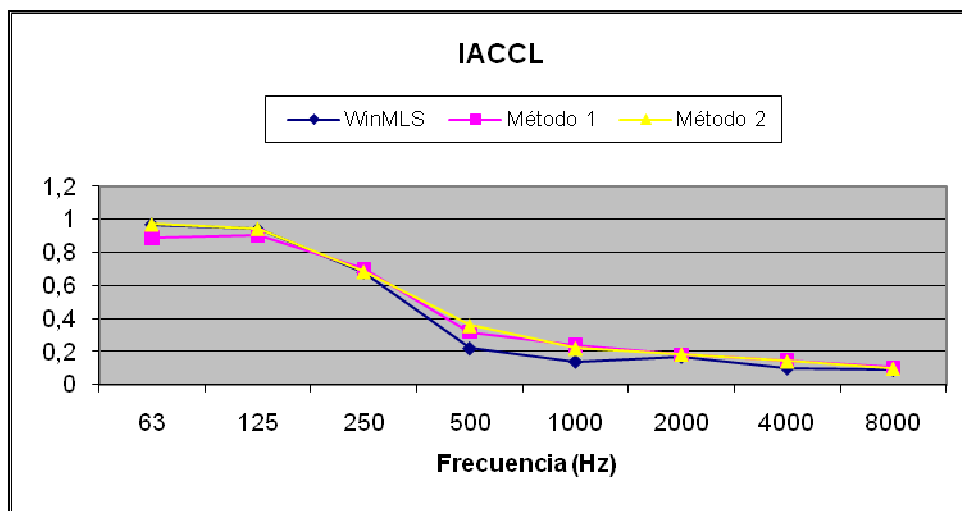


Figura 63. Comparativa IACCL

Punto de truncamiento

El proceso de truncamiento es análogo para ambos métodos, por ello presentan resultados casi idénticos. La única diferencia es la determinación del punto de inicio, sin embargo, esta definición no aporta cambios en los resultados para el punto de truncamiento.

Se observa que la estimación del punto de truncamiento realizada difiere en algunas bandas de octava. Esto es debido al tamaño del intervalo de integración. En el documento *Lundebj-Acustica 95* existe cierta libertad a la hora de determinar el tamaño de los intervalos. Observando la comparativa se deduce que el criterio seguido por *WinMLS* es diferente al respaldado en el algoritmo implementado.

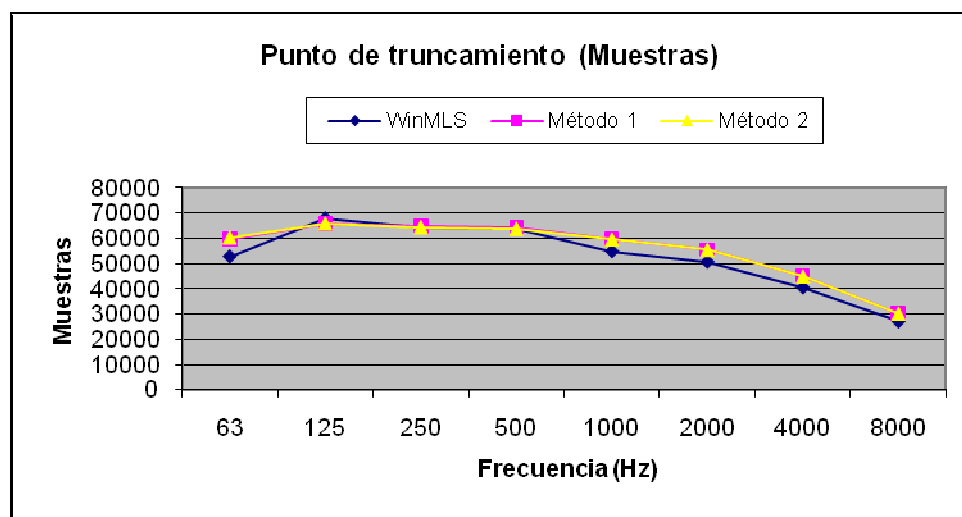


Figura 64. Comparativa punto de truncamiento

Relación señal ruido

Observando la gráfica, se aprecia como la relación señal ruido es similar a la presentada por el *WinMLS*. La relación señal ruido estimada se considera como óptima.

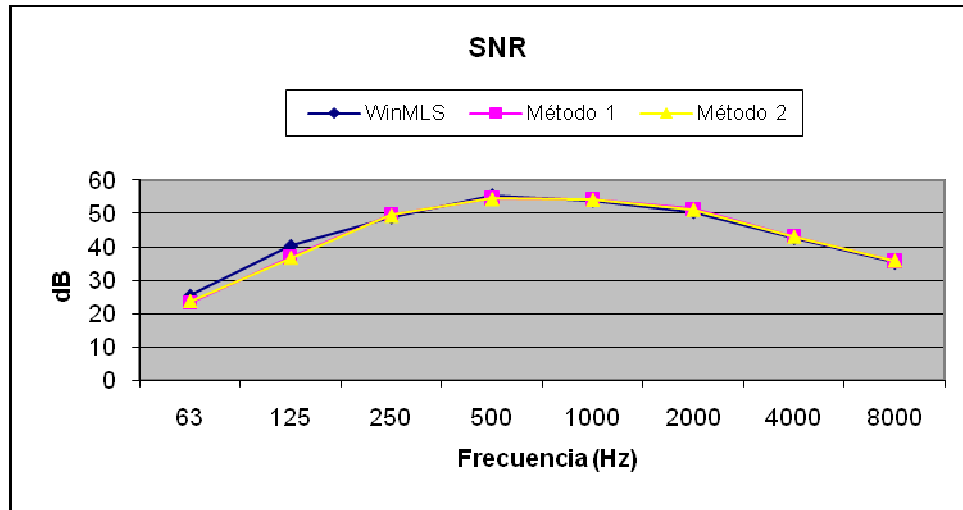


Figura 65. Comparativa SNR

edr

Para el caso del edr, parámetro similar al SNR, los resultados no son tan parecidos como en este último. Para el caso de los métodos implementados, a altas frecuencias, se consigue un rango de caída eficaz mayor.

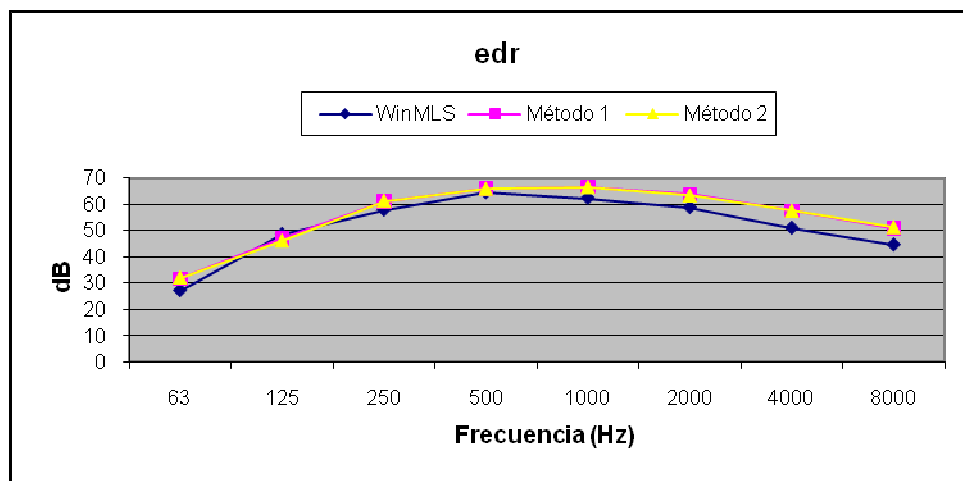


Figura 66. Comparativa edr

4.4. Análisis genérico con más señales

Para continuar con la valoración del código implementado, se realiza un análisis más genérico de otras 8 señales proporcionadas por el programa *WinMLS*. Se estudian los valores obtenidos mediante representaciones gráficas y se realiza la comparativa entre éstos y los valores que facilita *WinMLS*.

Considerando que el *WinMLS* sigue el mismo criterio que el *Método 2*, esta comparativa se realiza con el *Método 1* implementado. De esta manera las diferencias serán mayores. Otro motivo importante por el que se hace esta comparativa, es por que la norma *ISO 3382:2010* recomienda el uso del *Método 1*.

Estas ocho señales se dividen en cuatro grupos de dos. El primer grupo corresponde a señales captadas en el *Teatro Gayarre* de Iruña con un TR_{mid} de 1 segundo. El segundo corresponde a señales captadas en el *Teatro Bretón* de Logroño con un TR_{mid} de 1,4 segundos. El tercero a señales captadas en el *Auditorio Kursaal* de Donosti con un TR_{mid} de 1,9 segundos. Y por último el cuarto grupo corresponde a señales captadas en el *Auditorio Mozart* de Zaragoza con un TR_{mid} de 2,8 segundos. Para observar los resultados consultar el ANEXO D.

A continuación se enumeran los JND's de cada banda de octava para cada parámetro. Para conocer la definición y el valor del JND de cada parámetro ver el ANEXO E.

4.4.1. Número de JNDs

En la siguiente gráfica se muestra el número de JND's para el caso del *Teatro Gayarre*. Se realiza la media de la diferencia que presentan las dos señales medidas en el Teatro frente al *WinMLS*, dividido por el valor del JND de cada parámetro.

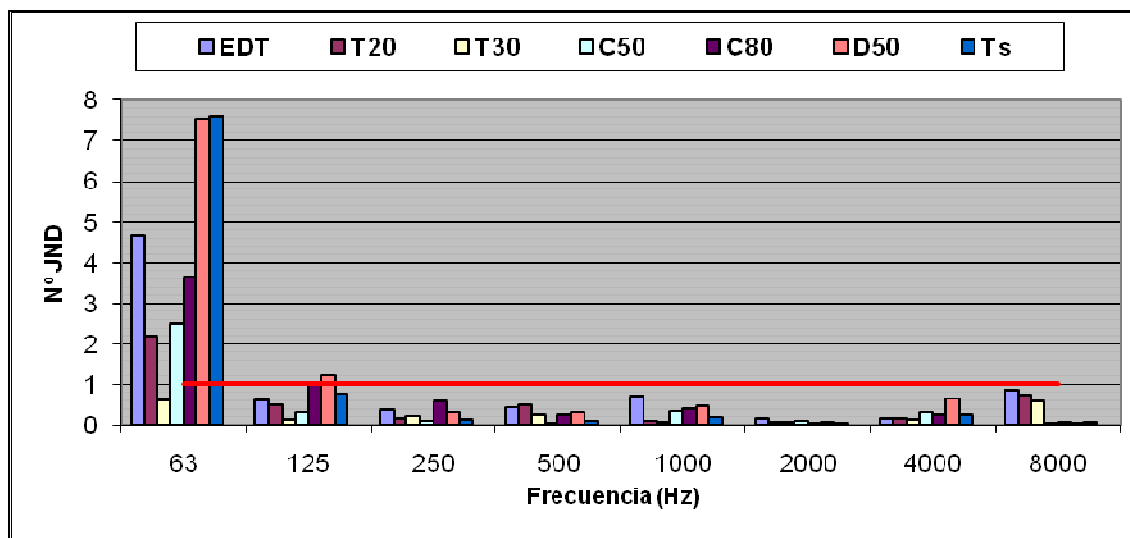


Figura 67. Número de JNDs

Para el *Teatro Bretón*, al igual que en el caso anterior, se realiza la media de la diferencia que presentan las dos señales medidas en el Teatro frente al *WinMLS*, dividido por el valor del JND de cada parámetro.

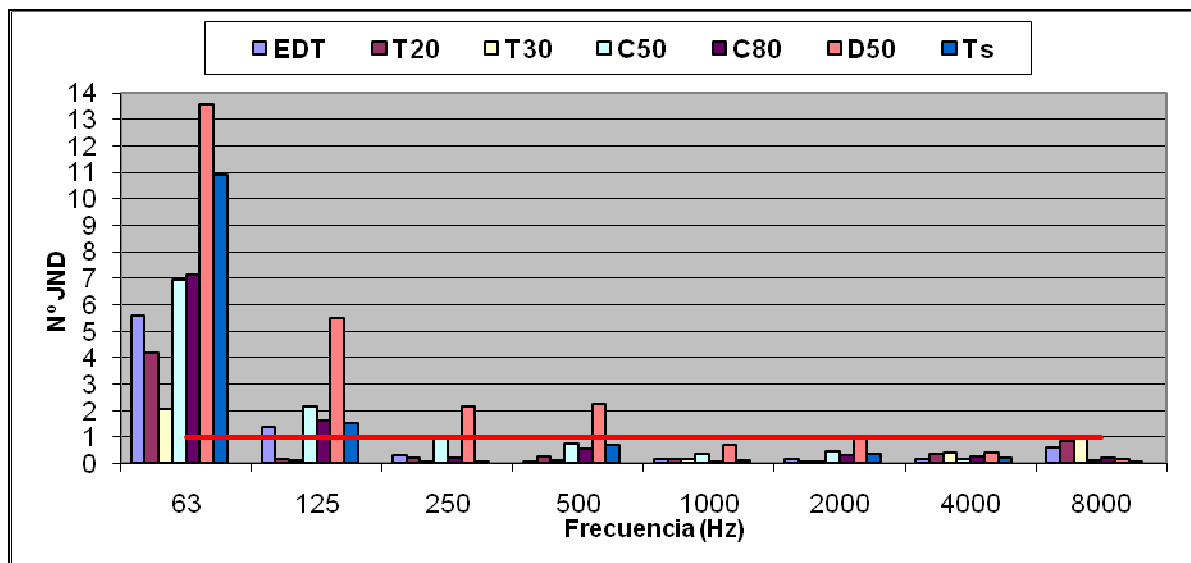


Figura 68. Número de JNDs

Para ello el *Auditorio Kursaal*, el número de JNDs se muestran en la siguiente gráfica:

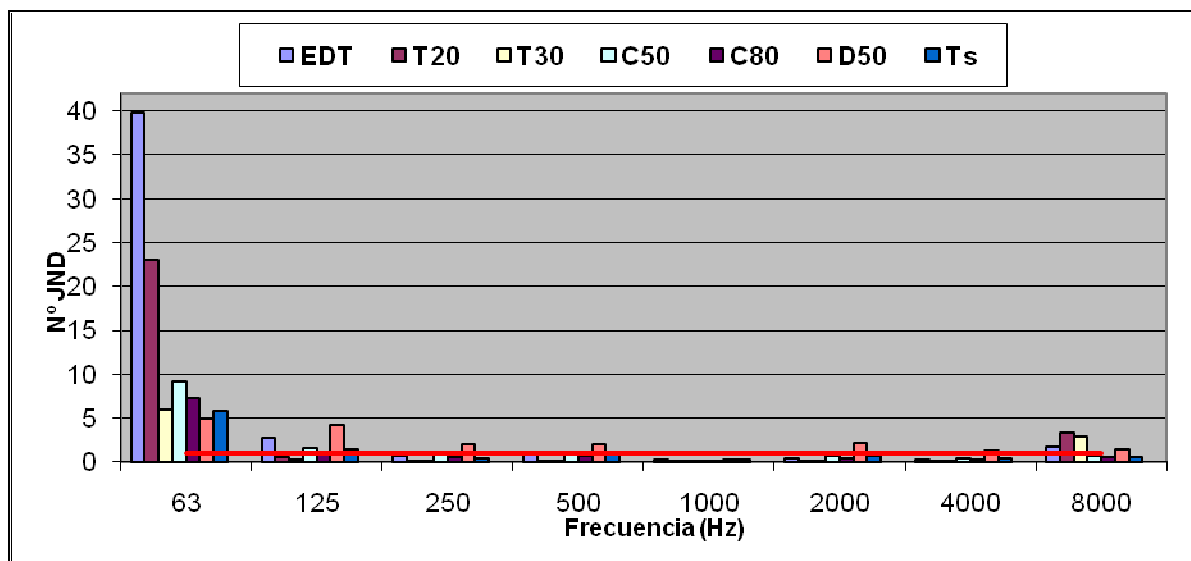


Figura 69. Número de JNDs

Y por último, el *Auditorio Mozart* presenta los siguientes números de JNDs para cada banda de octava:

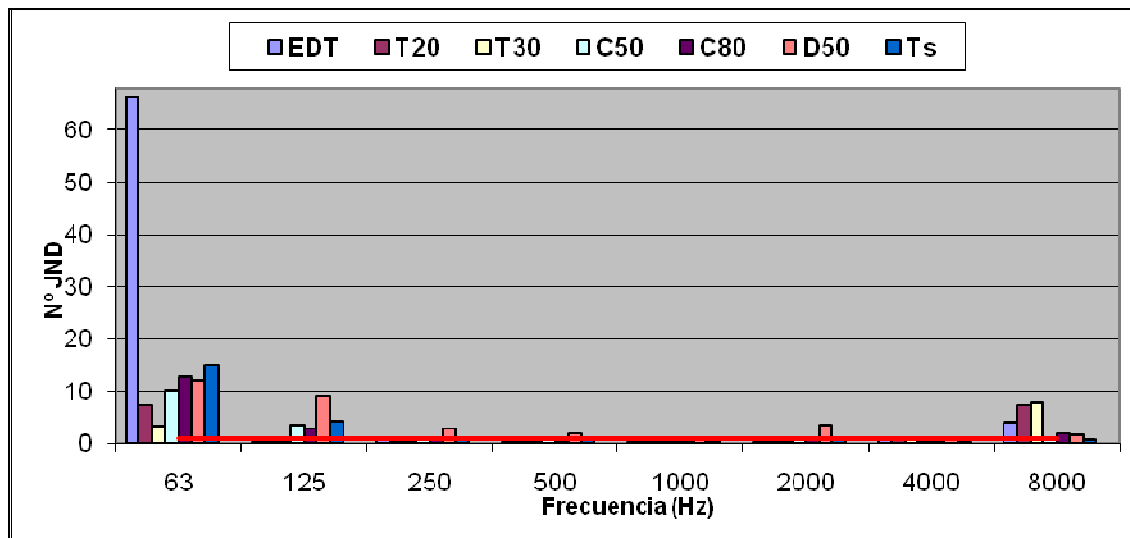


Figura 70. Número de JNDs

Como se puede observar en estas gráficas, el mayor número de JNDs lo encontramos a bajas frecuencias, concretamente en la banda centrada en 63 Hz. Las posibles variaciones entre el *Método 1* y la baja relación señal ruido en esta banda, hace que las diferencias sean mayores alcanzándose los 40 JNDs para algunos parámetros más sensibles como el EDT

Sin embargo, en el rango de frecuencias habitual (125 Hz - 4 KHz), en la mayoría de casos, los resultados no se desvían, más que el rango subjetivamente perceptible (JND).



INTERFAZ GRÁFICA

5. INTERFAZ GRÁFICA

5.1. Introducción

Una vez elaborado el código necesario para el software, la siguiente tarea es la realización de la interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphical User Interfaces). Para ello, ha sido empleado la herramienta *GUIDE* (Graphical User Interfase Development Enviroment) que dispone *Matlab*.

Matlab GUIDE es un entorno de programación visual para poder realizar y ejecutar programas de simulación a medida de forma rápida y simple. Es una herramienta que tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++.

En este apartado se explicará el procedimiento que se ha llevado a cabo para la creación de la interfaz gráfica de este proyecto.

5.2. Proceso de elaboración

Tras el estudio del funcionamiento de esta herramienta, la elaboración de la interfaz gráfica no ha sido tarea excesivamente complicada. Sin embargo, cabe decir que la GUI realizada podría resultar más eficaz, pero el objetivo principal de este proyecto tiene otros fines.

En los siguientes apartados se muestran las diferentes ventanas accesibles para el usuario y su correspondiente explicación.

5.3. Explicación ventanas para usuario

5.3.1. Portada

En esta primera ventana el usuario puede acceder al programa, o en caso de que quiera cerrarlo podrá presionar el botón *SALIR* y salir directamente.



Figura 71. Portada

5.3.2. Primera página

Si el usuario presiona el botón *ENTRAR* accederá directamente al programa y se le mostrará la siguiente ventana:

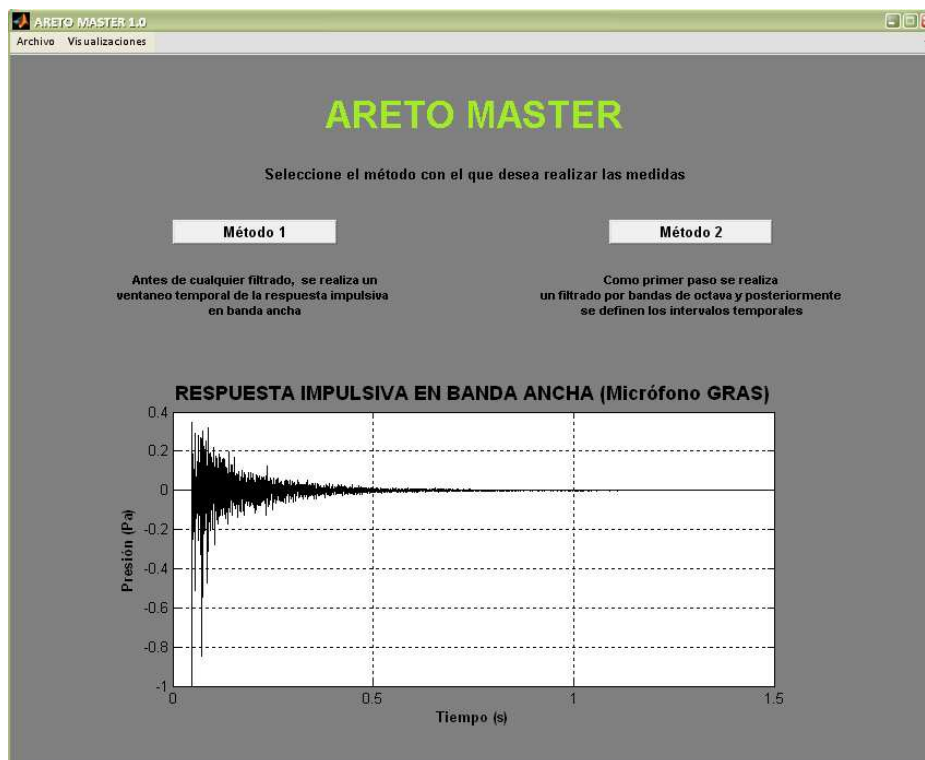


Figura 72. Página principal

Como se puede observar el usuario tiene a su disposición dos botones con los cuales podrá elegir el método con el que desea realizar los cálculos. También existe la posibilidad de salir del programa, para ello se desplegará el menú *Archivo* y seleccionar *Salir*.

Para la visualización de las respuestas impulsivas utilizadas para todos los cálculos, existe el menú *Visualizaciones*:

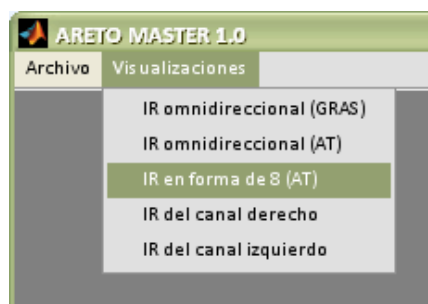


Figura 73. Menú desplegable Visualizaciones

La respuesta impulsiva seleccionada se mostrará en el eje principal de esta ventana.

Esta opción también está disponible en las ventanas correspondientes al método 1 y 2.

5.3.3. Elección Método 1

5.3.3.1. Captura de la respuesta impulsiva

Seleccionado el *Método 1* la ventana que posteriormente se abrirá será la siguiente:

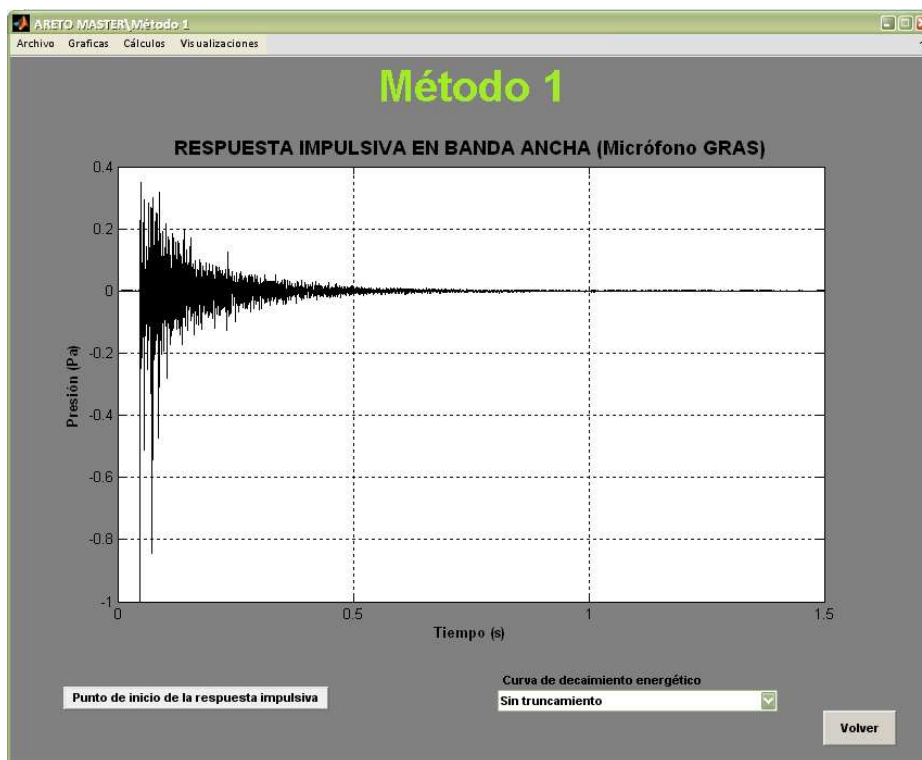


Figura 74. Ventana Método 1

Para poder volver a la página principal donde se puede seleccionar uno u otro método se presionará el botón *Volver*.

5.3.3.2. Punto de inicio de la respuesta impulsiva en banda ancha

Para que el usuario pueda acceder a la ventana que muestra el punto de inicio de la respuesta impulsiva en banda ancha, presionará el botón, de la ventana del *Método 1*, que se muestra a continuación.

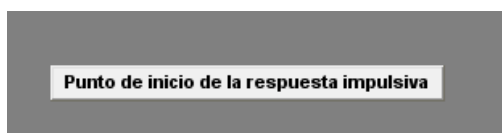


Figura 75. Botón punto de inicio

Tras esta elección se abrirá la siguiente pantalla:

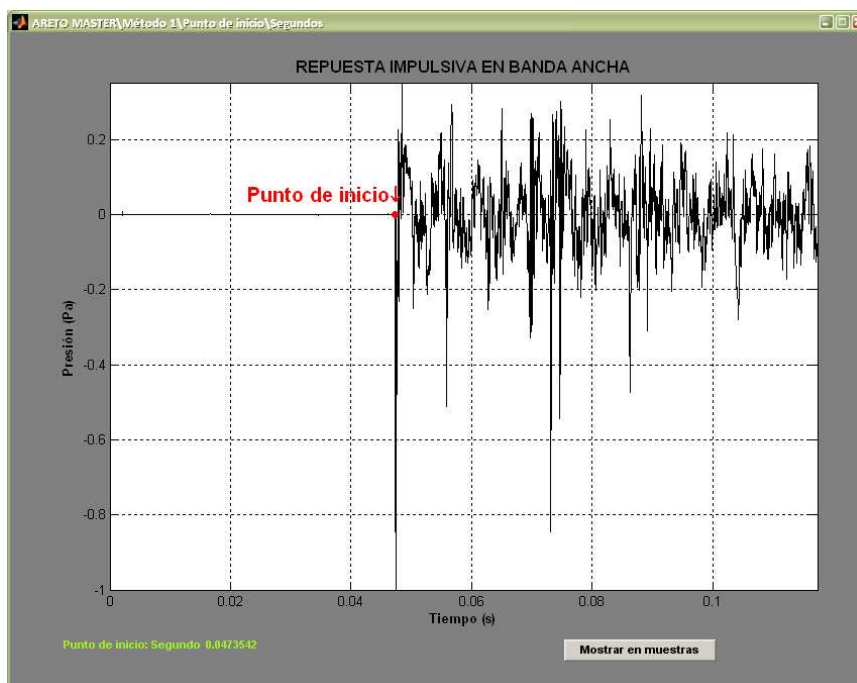


Figura 76. Punto de inicio en banda ancha

Aquí se mostrará la localización y el valor del punto de inicio en segundos. También cabe la posibilidad de mostrar este mismo valor pero en muestras, para ello se presionará el botón *Mostrar en muestras*.

5.3.3.3. Proceso de truncamiento

Para que el usuario pueda analizar todo el proceso de truncamiento, desplegará el menú *Gráficas* y seleccionará *Proceso de truncamiento*:

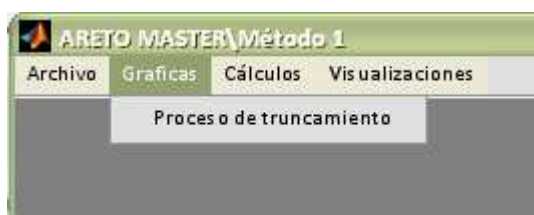


Figura 77. Menú desplegable *Gráficas*

Tras esta selección se abrirá la siguiente pantalla:

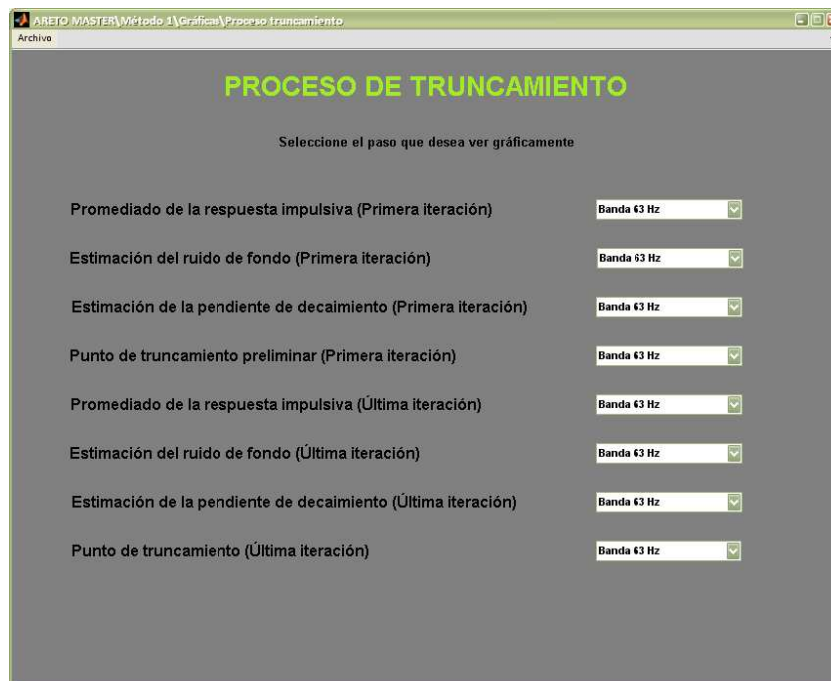


Figura 78. Ventana proceso de truncamiento

En esta pantalla se muestran todos los pasos elaborados en el proceso de truncamiento. El usuario podrá observar todos los resultados para cada banda de octava, para ello dispone de un *pop menú* en cada uno de los pasos:

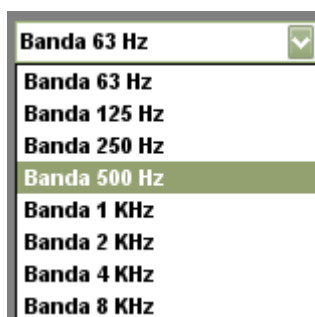


Figura 79. Pop menú para cada paso de proceso de truncamiento

Como ejemplo, a continuación se muestra la ventana que aparecería en el caso de seleccionar el punto de truncamiento de la última iteración para la banda de 2 KHz:

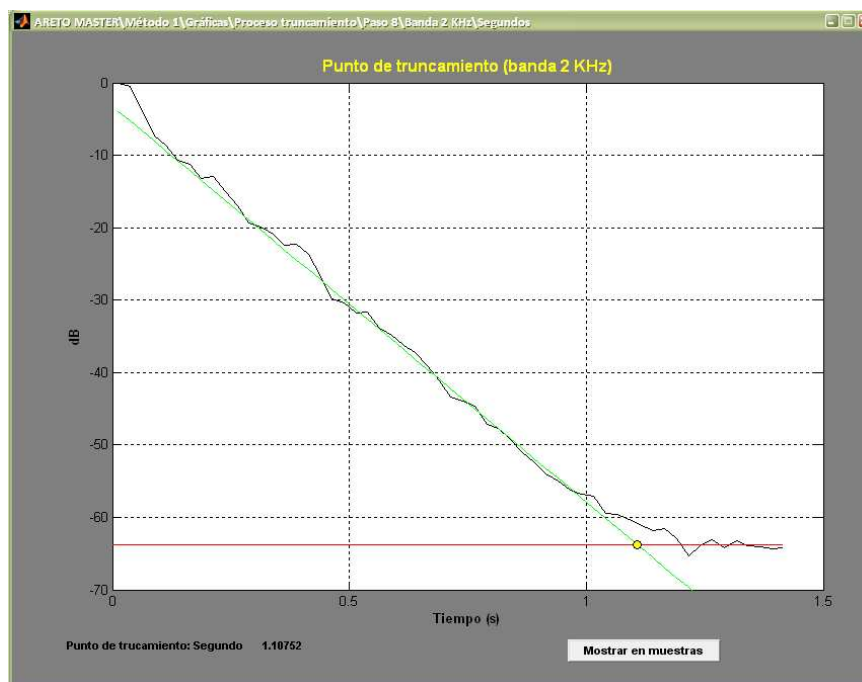


Figura 80. Punto de truncamiento para la banda de 2 KHz

Aquí se observa claramente el punto de truncamiento calculado al igual que su valor en segundos. También se puede mostrar esta gráfica y este valor en muestras. Para ello, el usuario seleccionará *Mostrar en muestras*.

5.3.3.4. Curva de decaimiento energético

Volviendo a la página principal de este primer método, el usuario podrá analizar las curvas de decaimiento de cada banda de octava. Para ello existe un *pop menú* en el cual se podrá seleccionar el tipo de curva que el usuario quiera ver. Exactamente son tres tipos de curvas. La primera serán las curvas de decaimiento de cada banda de octava sin truncamiento. La segunda opción serán estas mismas curvas pero con truncamiento. Y por último, la tercera opción mostrará las curvas de decaimiento energético truncadas y considerando la energía de compensación.

El *pop menú* es el siguiente:

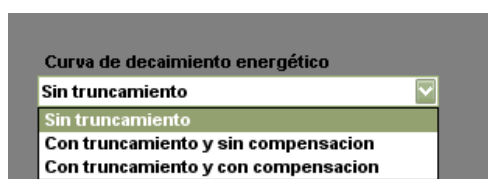


Figura 81. Pop menú para la elección de las curvas EDC

Seleccionando *Sin truncamiento* se abrirá la siguiente ventana:

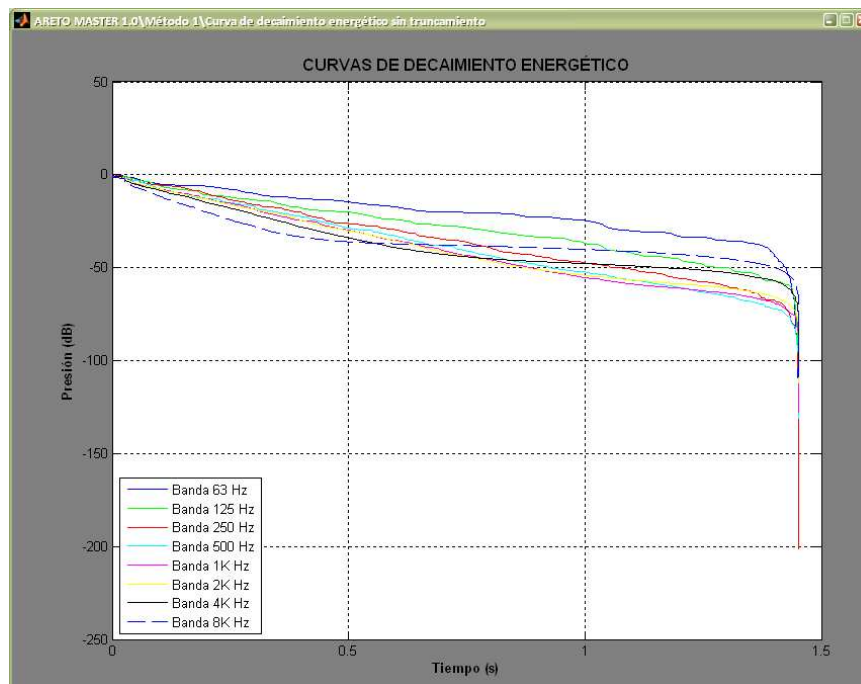


Figura 82. Curvas sin truncamiento

Seleccionando *Con truncamiento y sin compensación*:

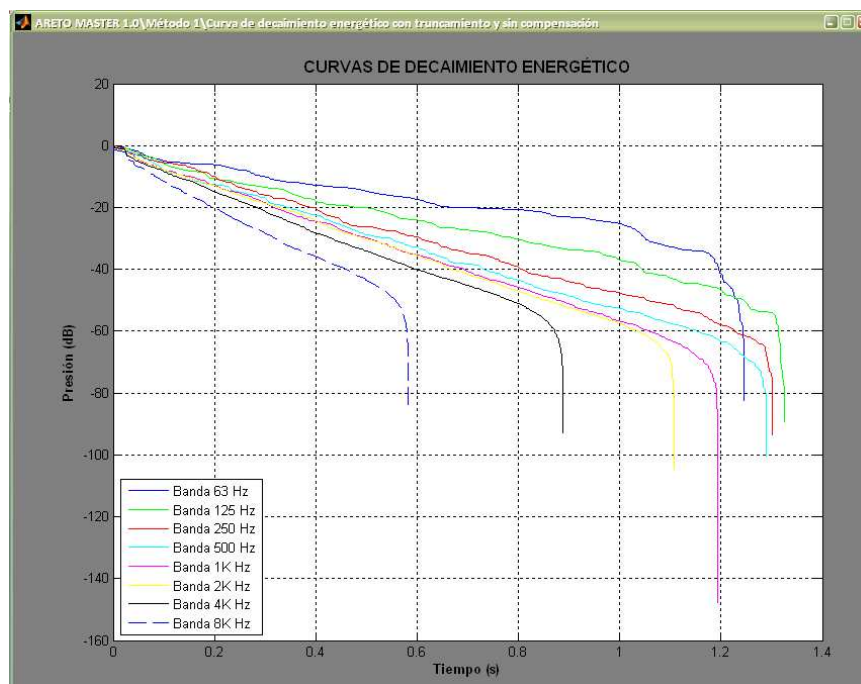


Figura 83. Curvas con truncamiento y sin compensación

Seleccionando Con truncamiento y con compensación:

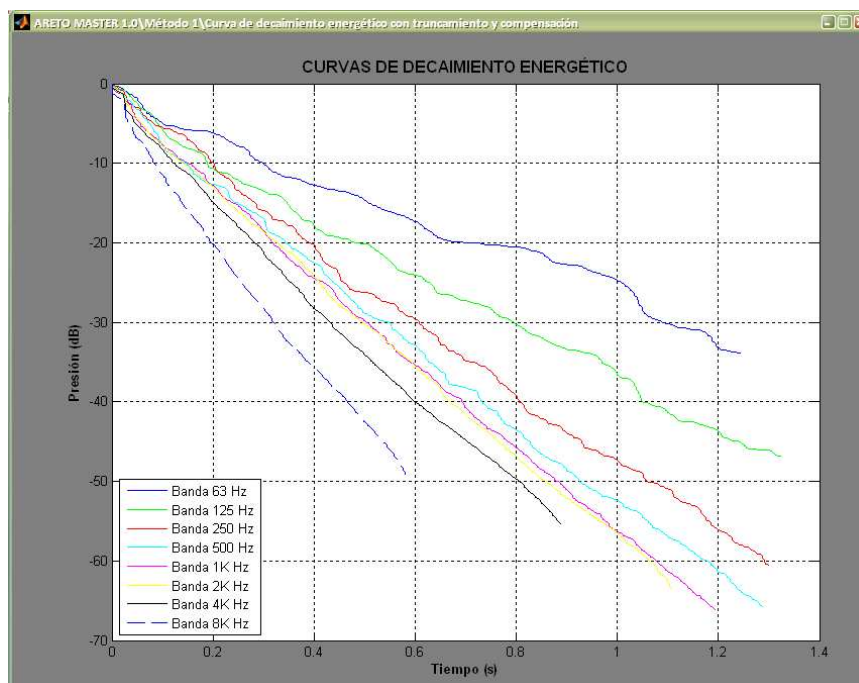


Figura 84. Curvas con truncamiento y compensación

5.3.3.5. Cálculos

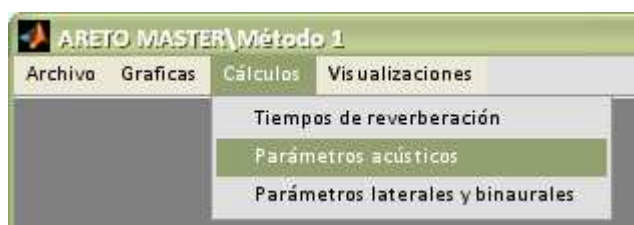
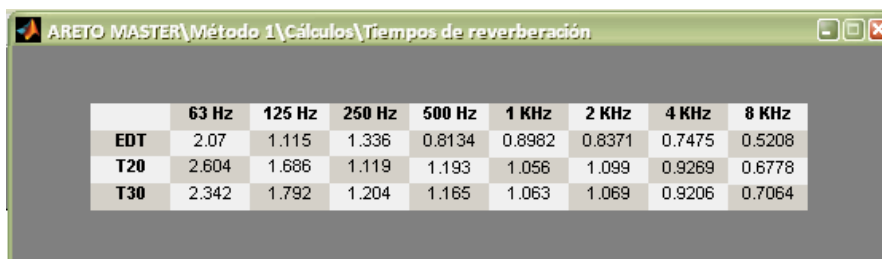


Figura 85. Menú desplegable para los cálculos de los parámetros

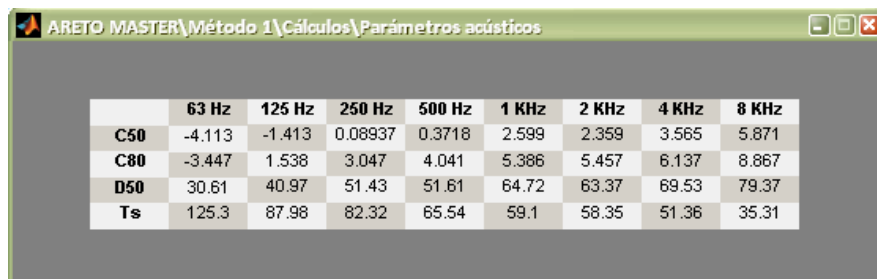
La opción para que el usuario pueda observar los valores de los parámetros se encuentra en el menú desplegable *Cálculos*. Aquí tendrá la opción de analizar los tiempos de reverberación, los parámetros acústicos y los parámetros laterales y binaurales. En caso de seleccionar *Tiempos de reverberación* se mostrará la siguiente tabla:



	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
EDT	2.07	1.115	1.336	0.8134	0.8982	0.8371	0.7475	0.5208
T20	2.604	1.686	1.119	1.193	1.056	1.099	0.9269	0.6778
T30	2.342	1.792	1.204	1.165	1.063	1.069	0.9206	0.7064

Figura 86. Tabla tiempos de reverberación

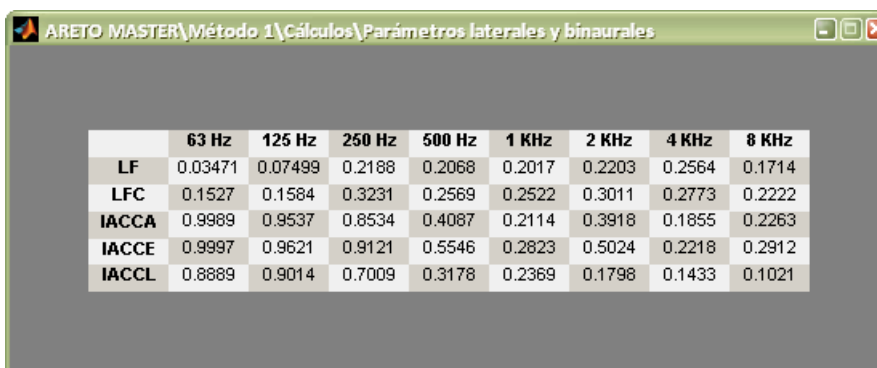
Asimismo, en caso de seleccionar *Parámetros acústicos* la tabla que se visualizará será la siguiente:



	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
C50	-4.113	-1.413	0.08937	0.3718	2.599	2.359	3.565	5.871
C80	-3.447	1.538	3.047	4.041	5.386	5.457	6.137	8.867
D50	30.61	40.97	51.43	51.61	64.72	63.37	69.53	79.37
Ts	125.3	87.98	82.32	65.54	59.1	58.35	51.36	35.31

Figura 87. Tabla parámetros acústicos

Y por último en caso de seleccionar *Parámetros laterales y binaurales*:



	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
LF	0.03471	0.07499	0.2188	0.2068	0.2017	0.2203	0.2564	0.1714
LFC	0.1527	0.1584	0.3231	0.2569	0.2522	0.3011	0.2773	0.2222
IACCA	0.9989	0.9537	0.8534	0.4087	0.2114	0.3918	0.1855	0.2263
IACCE	0.9997	0.9621	0.9121	0.5546	0.2823	0.5024	0.2218	0.2912
IACCL	0.8889	0.9014	0.7009	0.3178	0.2369	0.1798	0.1433	0.1021

Figura 88. Tabla parámetros laterales y binaurales

5.3.4. Elección Método 2

Volviendo a la página principal del programa donde cabe la posibilidad de elegir uno u otro método, en caso de seleccionar el *Método 2*, se abrirá la ventana que se mostrará al seleccionar este método será la siguiente:

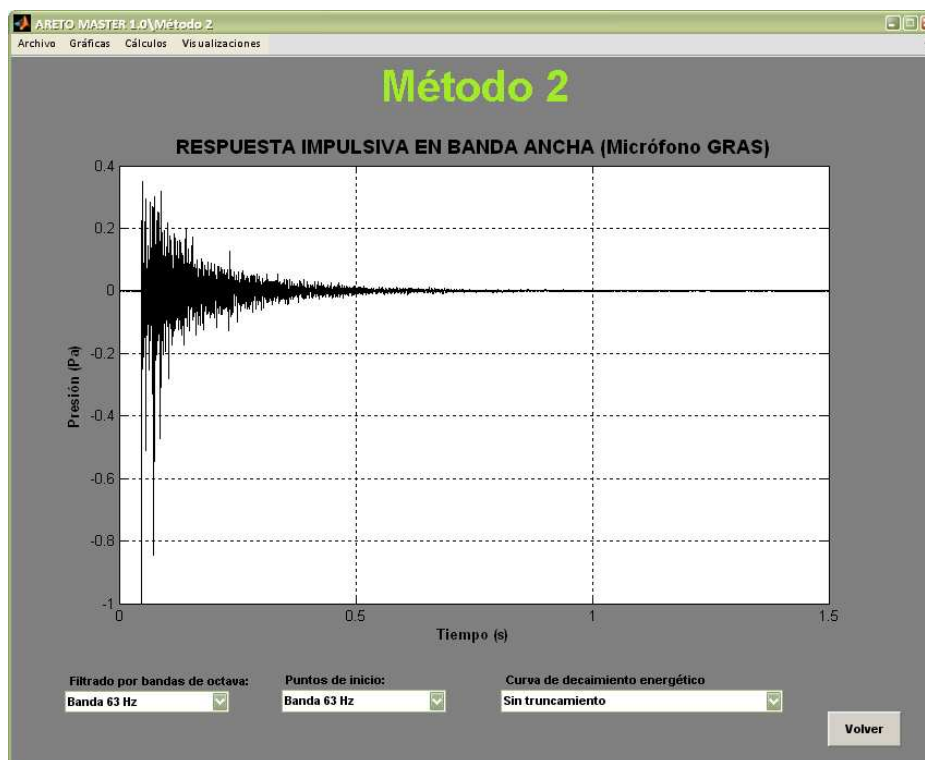


Figura 89. Ventana Método 2

Aquí, al igual que ocurriría con el *Método 1* el usuario tendrá diferentes opciones para poder analizar. En este apartado destacaremos las diferentes elecciones que se encuentran a disposición del usuario en comparación con el *Método 1*.

Para observar las curvas EDC, el proceso de truncamiento y los valores de los parámetros acústico el acceso es el mismo que en el *Método 1*.

En este caso también, presionando el botón *Volver* se accederá a la ventana donde se puede seleccionar un método u otro.

5.3.4.1. Filtrado de la respuesta impulsiva en bandas de octava

En este método el cálculo del punto de inicio de la respuesta impulsiva se realiza para cada banda de octava. Por ello, el usuario podrá observar cada banda de octava por separado. Para ello existe un pop menú en donde podrá elegir la banda que desea ver:

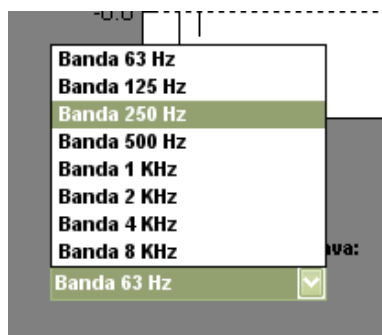


Figura 90. Pop menú para el filtrado por bandas de octava

En caso de seleccionar la banda de 4 KHz, por ejemplo, se accederá a la siguiente pantalla:

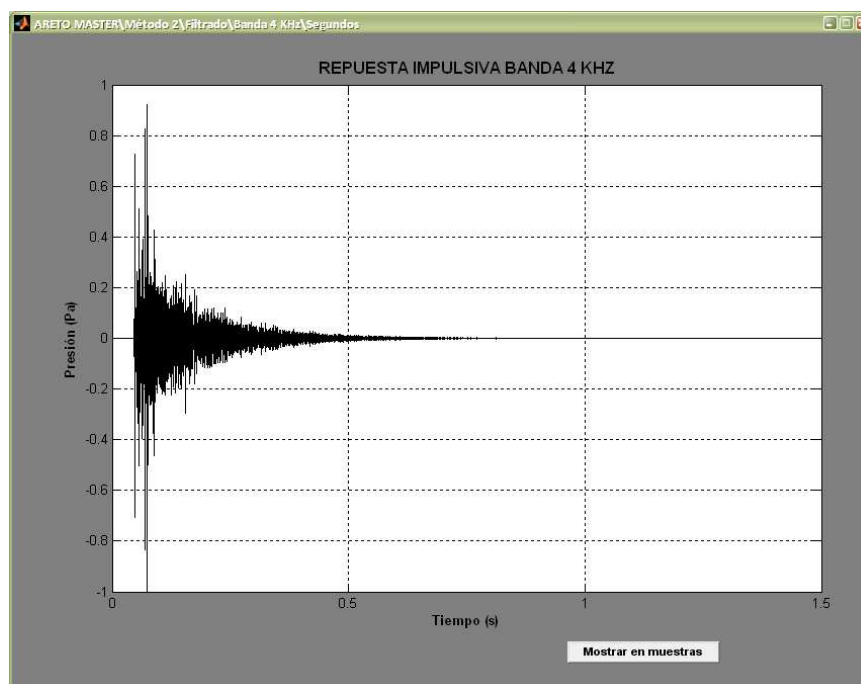


Figura 91. Filtrado de la banda de 4 KHz

La banda de octava en cuestión se muestra con el eje x en segundos, pero también cabe la posibilidad de observarla en muestras. Para ello bastará con presionar el botón *Mostrar en muestras*. Para el resto de bandas de octava ocurre lo mismo.

5.3.4.2. Punto de inicio de cada banda de octava

A diferencia del *Método 1*, el punto de inicio se calcula para cada banda de octava, por ello se podrá observar este resultado para cada una de ellas. Para ello en la página principal de este método existe un pop menú en donde el usuario podrá elegir el punto de inicio de cada banda de octava:

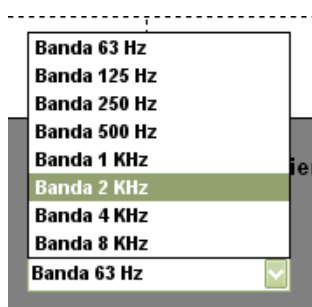


Figura 92. Pop menú para los puntos de inicio

En caso de seleccionar la banda centrada en 500 Hz, la ventana que se abrirá será la siguiente:

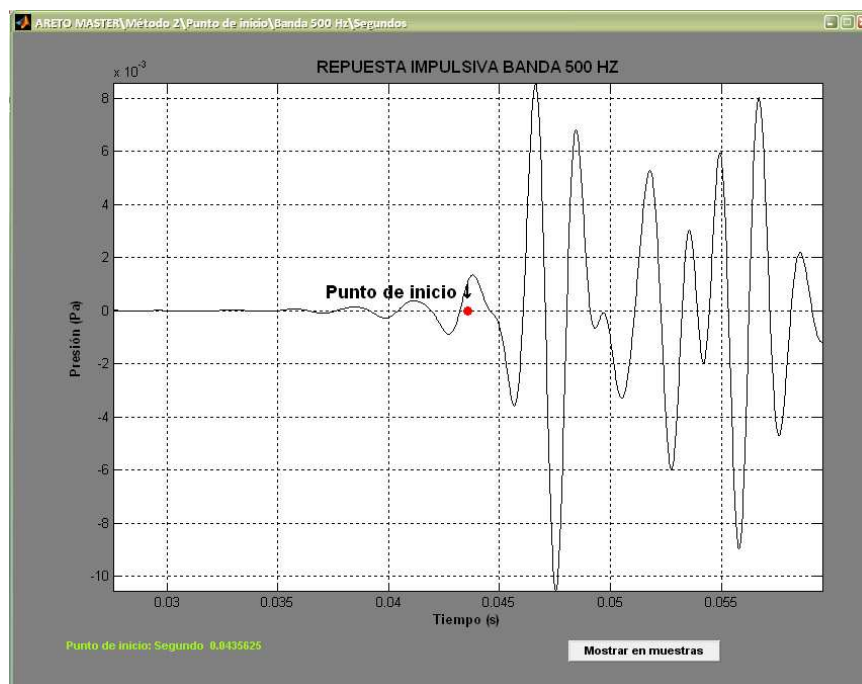


Figura 93. Punto de inicio de la banda de 500 Hz

Se mostrará el valor del punto de inicio en segundos y en caso de querer saber este mismo valor pero en muestras se presionará el botón *Mostrar en muestras*.

5.3.5. Página despedida

En ambos métodos en el menú desplegable *Archivo*, seleccionando *Salir*, se mostrará la ventana de despedida:



Figura 94. Ventana de despedida



VALORACIÓN DEL SOFTWARE

6. VALORACIÓN DEL SOFTWARE

En este apartado se realiza la valoración del proyecto elaborado. Destacando los apartados con más influencia en los resultados obtenidos.

- **Influencia del filtrado por bandas de octava**

Siguiendo los criterios de la norma *IEC 61260*, se ha diseñado un filtro *Butterworth*, de orden 3, capaz de filtrar la respuesta impulsiva en bandas de octava. Con la implementación de este filtro, para el *Método 2*, posteriormente se define con exactitud el punto de inicio de cada banda de octava.

Para los dos métodos es esencial realizar un filtrado correcto, debido a que es necesario para posteriormente definir los parámetros derivados de la respuesta impulsiva.

- **Influencia del enventanado en intervalos de tiempo**

Se define un enventanado temporal en ambos métodos. Para el *Método 1*, el enventanado es anterior al filtrado, por lo que requiere una definición correcta de los intervalos temporales. Éstos, tras varias pruebas y estudios realizados, se definen de la mejor forma posible.

Para el *Método 2*, en el cual el enventanado se realiza tras el filtrado, se consiguen resultados más parecidos a los obtenidos con WinMLS. Sin embargo, la recomendación de la norma *ISO 3382:2010* es el *Método 1*.

- **Influencia de la localización del punto de inicio**

Siguiendo el criterio exigido por la norma *ISO 3382:2010*, la definición del punto de inicio para ambos métodos se consigue de forma muy precisa.

- **Influencia de la localización del punto de truncamiento**

Tras la implementación del proceso iterativo expuesto por el documento *Lundeby-Acustica 95*, desarrollando cada paso de este de forma cuidadosa, se define el punto de truncamiento para cada banda de octava, al igual que el ruido de fondo presente en cada una de ellas.

Tras la comparativa con el programa *WinMLS* se consiguen resultados muy satisfactorios.

- **Influencia de la energía de compensación**

La influencia del truncamiento de cada banda de octava provoca una caída brusca de la curva de decaimiento energético en este punto, debido a la pérdida de energía. Por ello es esencial el cálculo de la energía de compensación para cada una de las bandas de octava.

Estudiando el documento *Lundeby-Acustica 95* e implementando los cálculos necesarios relativos a esta energía, se definen las curvas de decaimiento sin la caída brusca que surge en el punto de truncamiento.

- **Parámetros derivados de la respuesta impulsiva**

En ambos métodos se definen con exactitud todos los parámetros derivados de la respuesta impulsiva. Sin embargo, existen bandas de octava, sobre todo las de baja frecuencia, donde se encuentran ciertos problemas a la hora de determinar los valores con exactitud.



- **Agilidad del algoritmo**

En general se ha desarrollado un algoritmo rápido, el cual no requiere demasiado tiempo para la ejecución de todas sus funciones.

- **Interfaz gráfica**

Sin apenas experiencia previa de la herramienta *GUIDE* que proporciona *Matlab*, se conseguido desarrollar una interfaz gráfica ágil y atractiva visualmente.



PROPUESTA DE MEJORA

7. PROPUESTA DE MEJORA

- **Filtrado por bandas de octava**

Hay en ciertas bandas de octava, donde la definición de los valores de los parámetros derivados de la respuesta impulsiva, no se consiguen de forma precisa. Estas bandas de octava son las de baja frecuencia, estas presentan más problemas tras el filtrado, ya que este introduce retardos más significativos en estas bandas.

Una mejora del programa sería realizar un análisis en bandas de 1/3 de octava.

- **Enventanado en intervalos de tiempo**

En el momento en que se definen los intervalos temporales para el *Método 1*, considerando un aumento de los periodos para incluir la energía retardada por los filtros, esta determinación no es tan precisa como en el *Método 2*. En éste, se calcula con más exactitud el retardo introducido por los filtros.

- **Proceso de truncamiento**

El proceso de truncamiento desarrollado se considera bastante óptimo. La definición del ruido de fondo para cada banda de octava se juzga de forma muy favorable. Observando las gráficas referentes a la relación señal ruido, se aprecia que apenas se encuentran diferencias respecto al programa *WinMLS*.

A la hora de definir el tamaño de los intervalos para el promediado de la respuesta impulsiva, el documento *Lundeby-Acustica 95* permite cierta libertad. Por ello se encuentran diferencias frente al *WinMLS*. Se propone un estudio del criterio considerado por este programa y así realizar una comparativa más precisa con el *Método 2* implementado.

Parámetros derivados de la respuesta impulsiva

La implantación de los parámetros derivados de la respuesta impulsiva es tarea fácil. Simplemente consiste en el desarrollo de las fórmulas expuestas por la norma *ISO 3382:2010*. Sin embargo, debido a los problemas introducidos por el filtrado y el enventanado de la respuesta impulsiva, existen ciertos parámetros donde se podrían conseguir mejores resultados.

Se propone también, la implementación del parámetro G (Fuerza sonora).

- **Interfaz gráfica**

Es conveniente una mejora de la interfaz gráfica desarrollada. El código generado puede resultar más eficaz tras un estudio más detallado de la herramienta *GUIDE* que dispone *Matlab*.

- **Sincronización con el proyecto final de carrera correspondiente a la captura de la respuesta impulsiva**

Se propone la sincronización con el proyecto final de carrera “Optimización de la señal de excitación para la obtención de respuestas al impulso en acústica de salas” realizado por Lander Egia.

- **Ejecutable para la interfaz gráfica**

Queda pendiente por realizar el ejecutable para la interfaz gráfica. Hecho esto el programa implementado podrá ser utilizado por cualquier usuario.



CONCLUSIONES

8. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un software de análisis acústico, capaz de calcular, mediante la comparativa de dos métodos diferente, los parámetros acústicos que derivan de la respuesta impulsiva.
- Es de gran importancia una buena normalización de la respuesta impulsiva.
- Las bandas más conflictivas son las bandas de octava de baja frecuencia y concretamente la banda de 63 Hz. Esto es debido al retardo significativo que introduce el filtro a bajas frecuencias y por la baja relación señal ruido habitualmente frecuente en este rango frecuencial.
- En la integral para la definición de la curva de decaimiento, C se fija a 0, por ello se debe tener en cuenta que el punto de inicio finito de la integración conlleva una subestimación sistemática del tiempo de reverberación. Para una subestimación máxima del 5%, el nivel de ruido de fondo debe ser al menos el rango de evaluación más 15 dB por debajo del nivel máximo de la respuesta impulsiva (ISO 3382:2010).
- Utilizado el promediado temporal en el punto de truncamiento, es necesario verificar que el proceso de promediado no altera la respuesta impulsiva medida.
- Para las caídas no homogéneas, la determinación de los tiempos de reverberación EDT, T20 y T30 es muy sensible a las diferentes variables presentes en el análisis, tales como la estimación del punto de truncamiento o el tamaño del intervalo de integración
- Los filtros introducen retardos en la señal y su diferente tratamiento puede provocar cambios significativos en los parámetros derivados de la respuesta al impulso para las bandas de octava de baja frecuencia donde los retardos son mayores.
- Tras el análisis de los resultados, parece que *WinMLS* se basa en el *Método 2*. Sin embargo, la recomendación de la *ISO 3382:2010* nos hace pensar que el *Método 1* desarrollado ofrece resultados más fiables.
- Se ha optimizado el análisis de truncamiento y compensación logrando unos rangos de caída efectiva (edr) superiores a los del software comercial, lo que permite medir parámetros en situaciones más desfavorables en cuanto a relación señal ruido.
- Comparando los resultados de los valores de los parámetros acústicos ofrecidos por el programa implementado con los obtenidos con el software comercial, éstos no se desvían más que el rango subjetivamente perceptible (jnd) en el rango de frecuencias habitual (125-4 kHz).
- Para bajas frecuencias, las posibles variaciones entre los métodos implementados y la baja relación señal ruido hace que las diferencias sean mayores, alcanzándose niveles hasta 40 JNDs superiores, para algunos parámetros más sensibles como el EDT.
- Las mayores ventajas que presenta el programa desarrollado frente al programa comercial, son el mayor control sobre el algoritmo diseñado y su precio. El *WinMLS* puede llegar a costar 500 € en el mercado comercial.



BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

- DISEÑO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS. Antoni Carrión Isbert. Universidad Politécnica de Cataluña, 1998.
- Müller S., Massarani, P., "Transfer-Function measurement with sweeps". *Journal of the Audio Engineering Society* 49(6), 443-471, 2001.
- IEC 61260 *Electroacústica. Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava*.
- UNE-EN ISO 3382-1, Medición de parámetros acústicos, Febrero 2010.
- "Uncertainties of Measurements in Room Acoustics". A. Lundeby, T. E. Vigran. H. Bietz, M. Vorländer. 1995.



ANEXOS

ANEXO A. Filtro Butterworth

Respuesta en amplitud y fase del filtro Butterworth aplicado para el filtrado por bandas de octava

En las siguientes figuras se muestra las respuestas en amplitud y fase normalizadas. La frecuencia de normalización es la correspondiente a la frecuencia central de cada banda de octava.

Banda 63 Hz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 63 Hz:

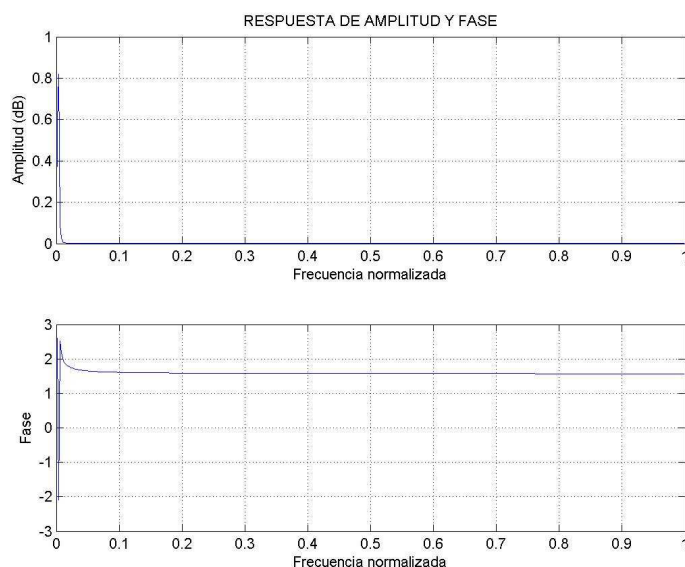


Figura 95. Filtro paso banda para la banda de 63 Hz

Banda 125 Hz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 125 Hz:

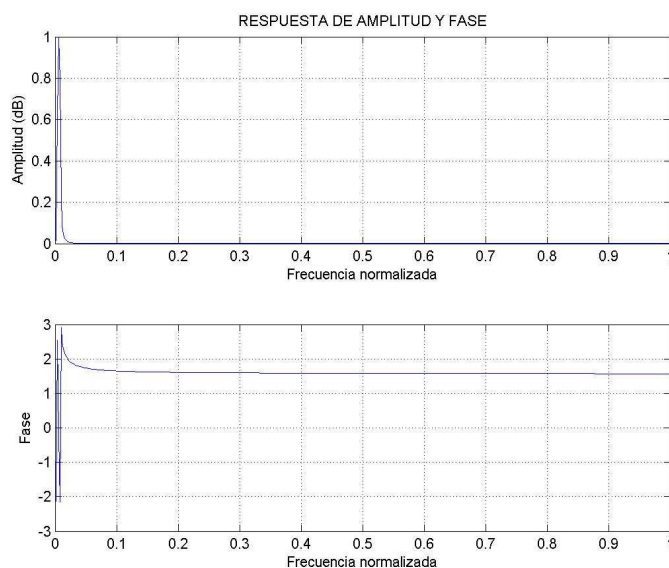


Figura 96. Filtro paso banda para la banda de 125 Hz

Banda 250 Hz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 250 Hz:

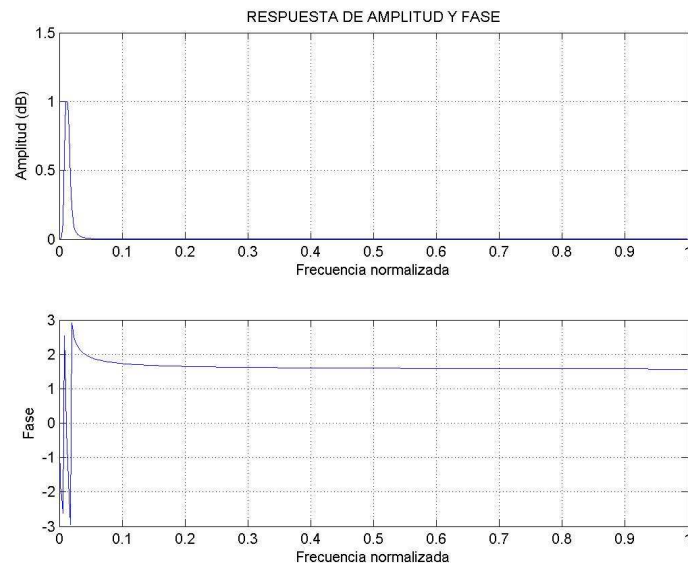


Figura 97. Filtro paso banda para la banda de 250 Hz

Banda 500 Hz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 500 Hz:

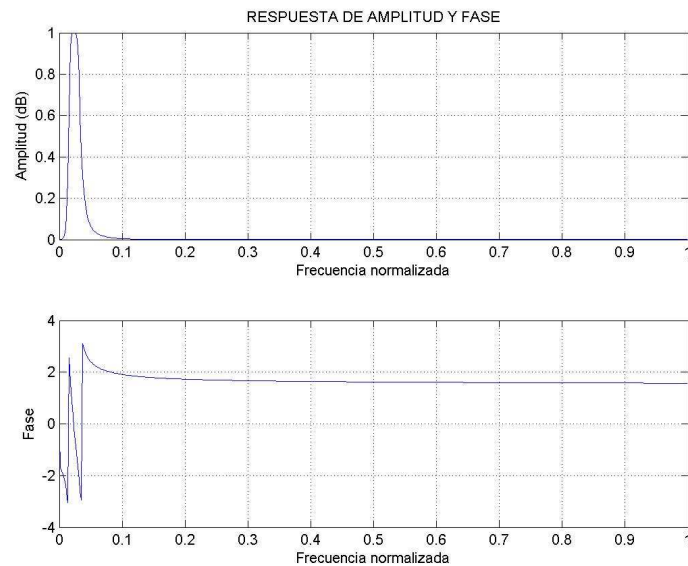


Figura 98. Filtro paso banda para la banda de 500 Hz

Banda 1 KHz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 1 KHz:

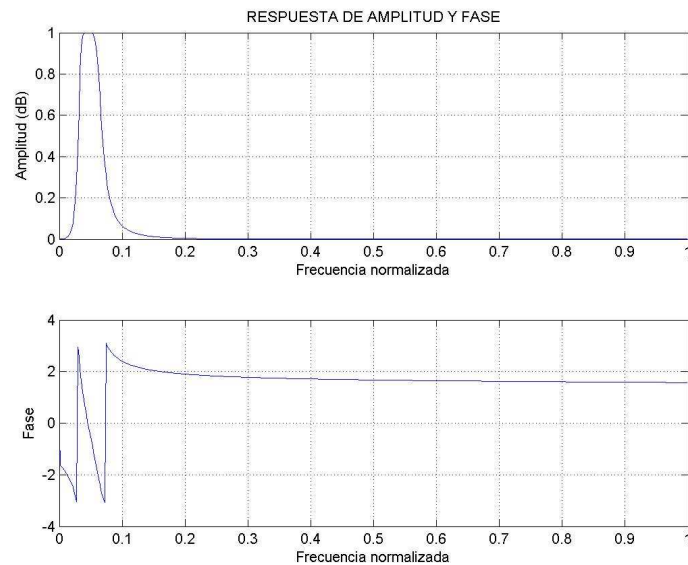


Figura 99. Filtro paso banda para la banda de 1 KHz

Banda 2 KHz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 2 KHz:

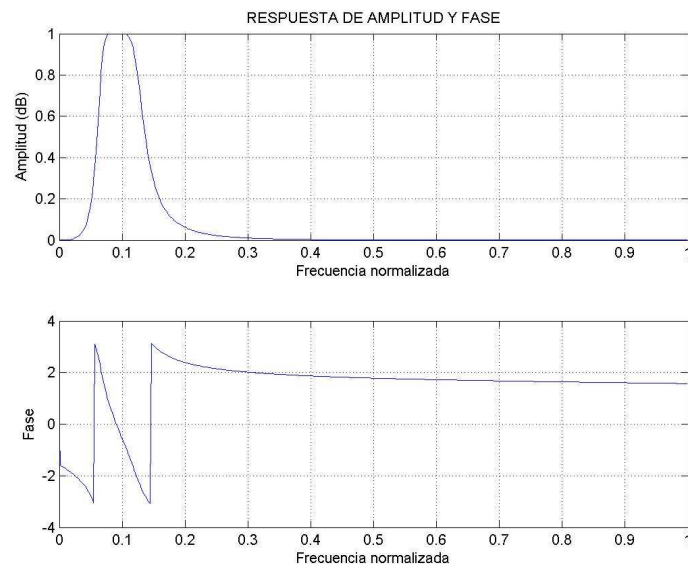


Figura 100. Filtro paso banda para la banda de 2 KHz

Banda 4 KHz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 4 KHz:

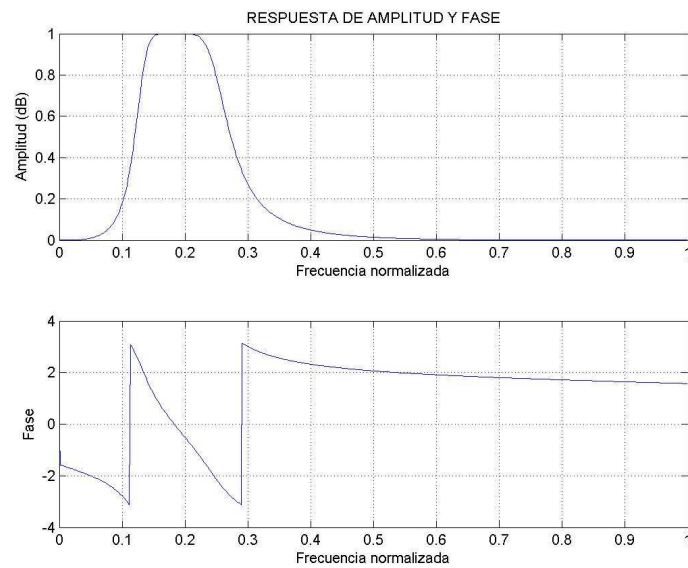


Figura 101. Filtro paso banda para la banda de 4 KHz

Banda 8 KHz

Filtro paso banda centrado a la frecuencia de 8 KHz:

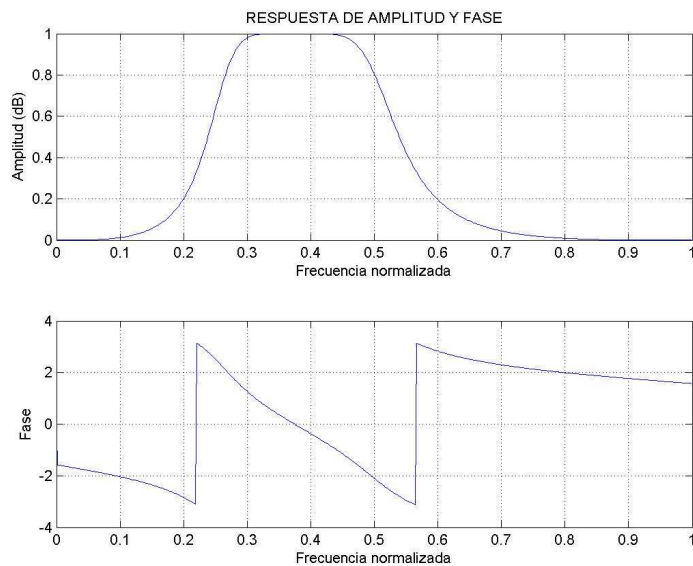


Figura 102. Filtro paso banda para la banda de 8 KHz

ANEXO B. Proceso de truncamiento

A continuación se expone visualmente el proceso de truncamiento completo para cada banda de octava.

Paso 1: Promedio del cuadrado de la respuesta impulsiva en intervalos de tiempo local

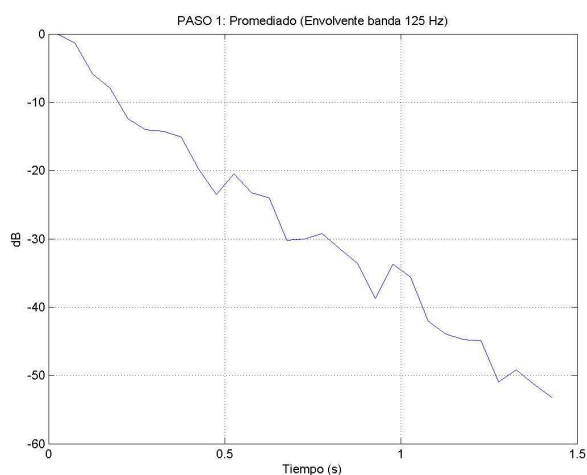
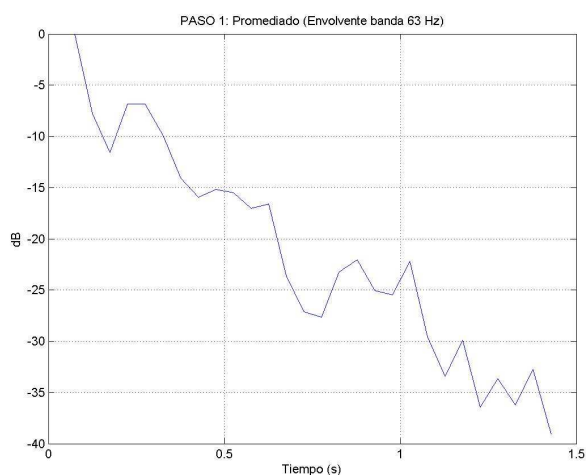


Figura 103. Media de las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

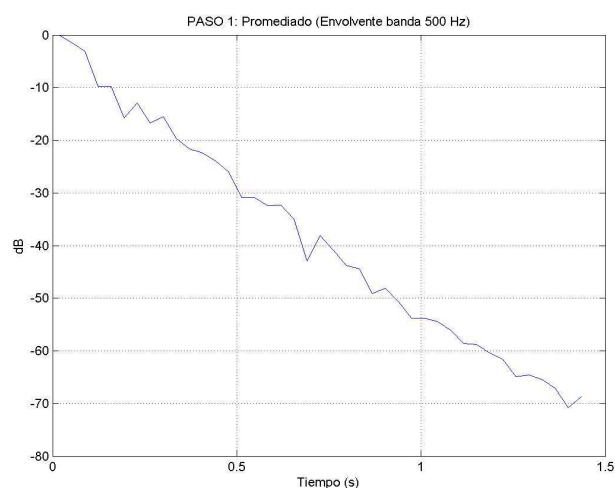
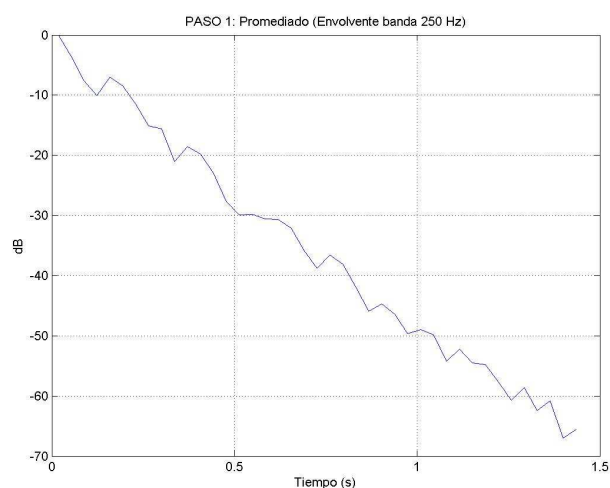


Figura 104. Media de las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

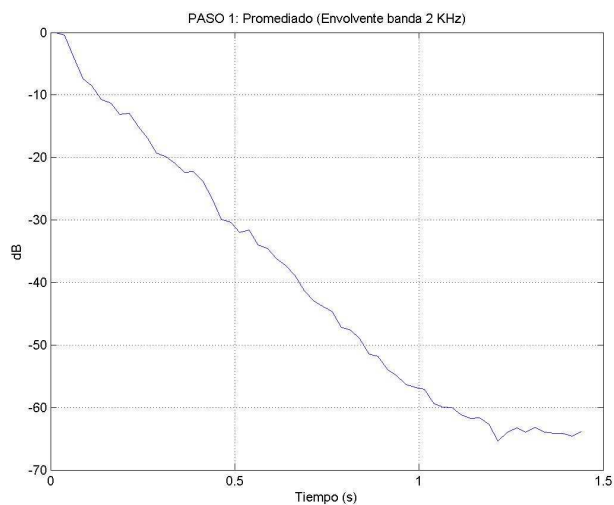
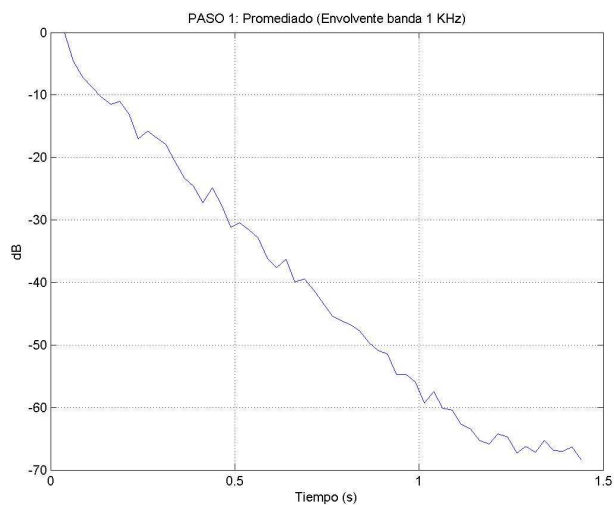


Figura 105. Media de las bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz

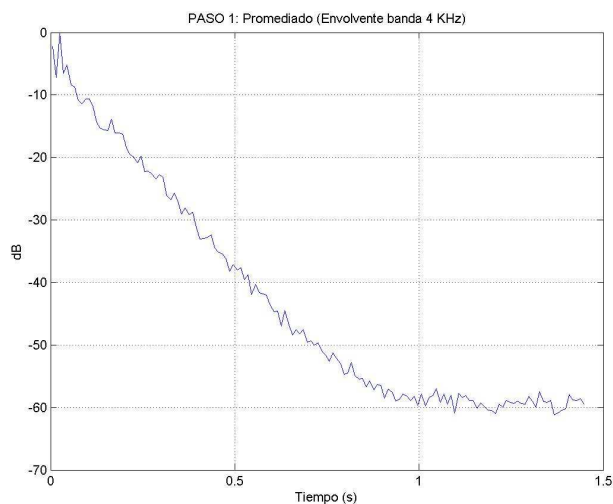
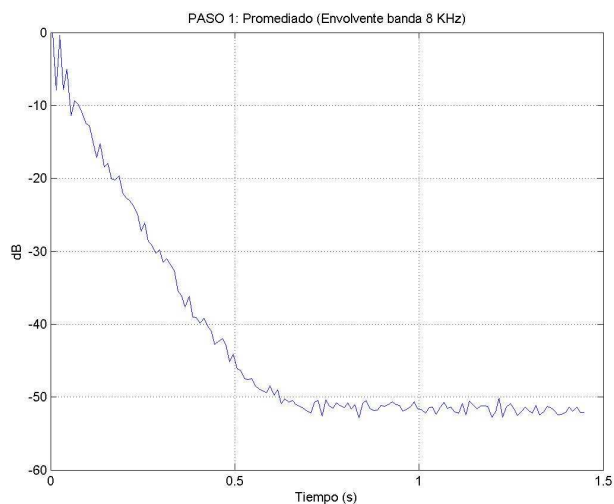


Figura 106. Media de las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz

Paso 2: Estimación del nivel de ruido de fondo utilizando la cola

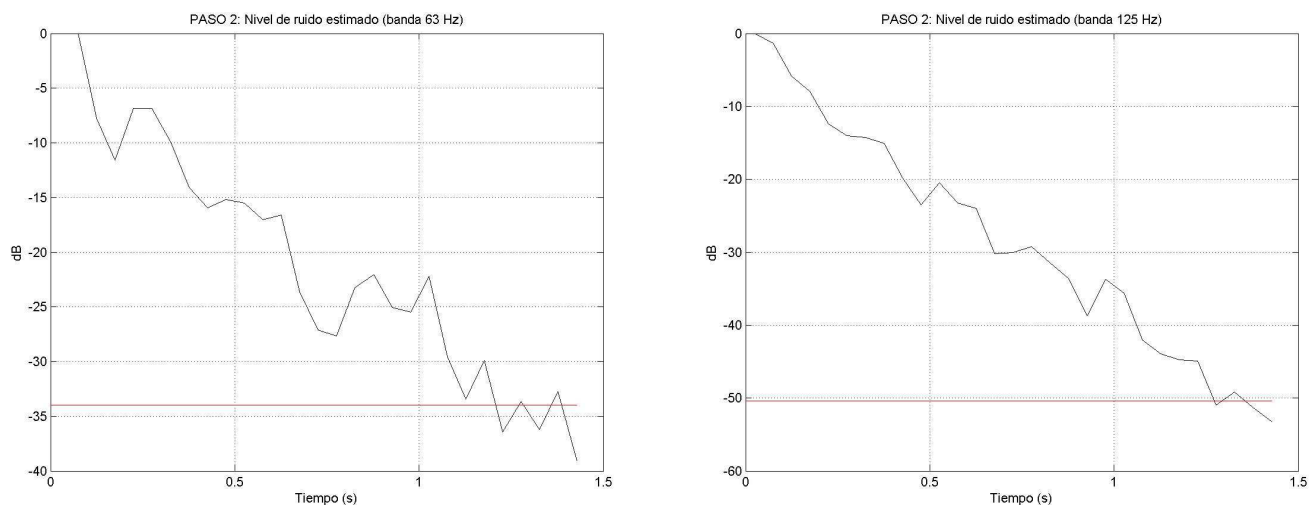


Figura 107. Media y ruido de fondo estimado de las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

Para la banda centrada en 63 Hz, el valor del ruido de fondo estimado (normalizado respecto al valor máximo de la media) en la primera iteración es de -33,9589 dB.

Para la banda de 125 Hz el ruido de fondo normalizado tiene un valor de -50,3846 dB.

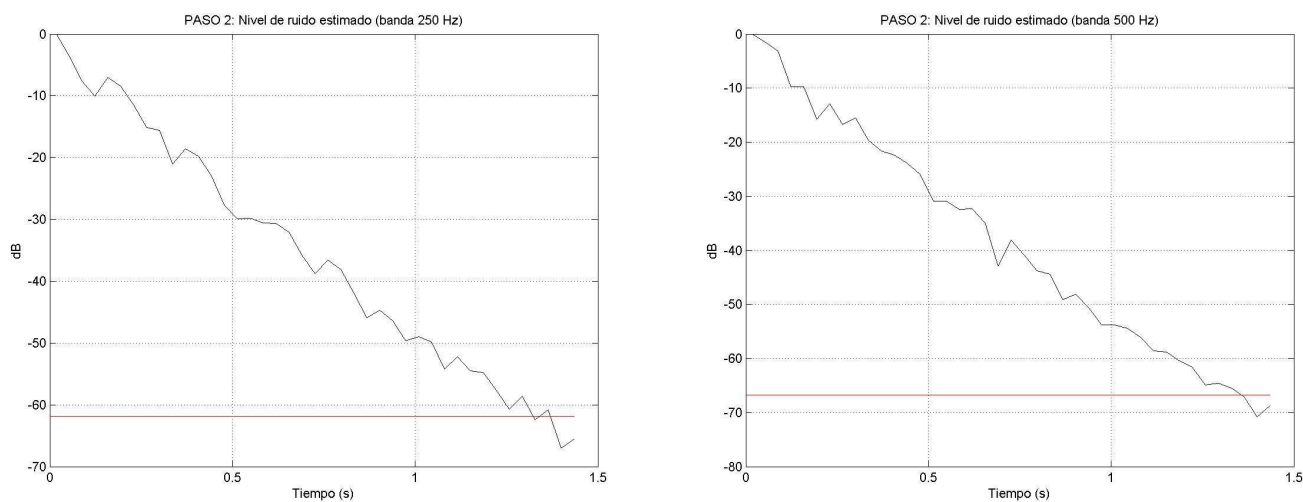


Figura 108. Media y ruido de fondo estimado de las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

Para la banda de 250 Hz el ruido tiene un valor de -61,8382 dB.

Para la banda de 500 Hz el ruido tiene un valor de -66,8011 dB

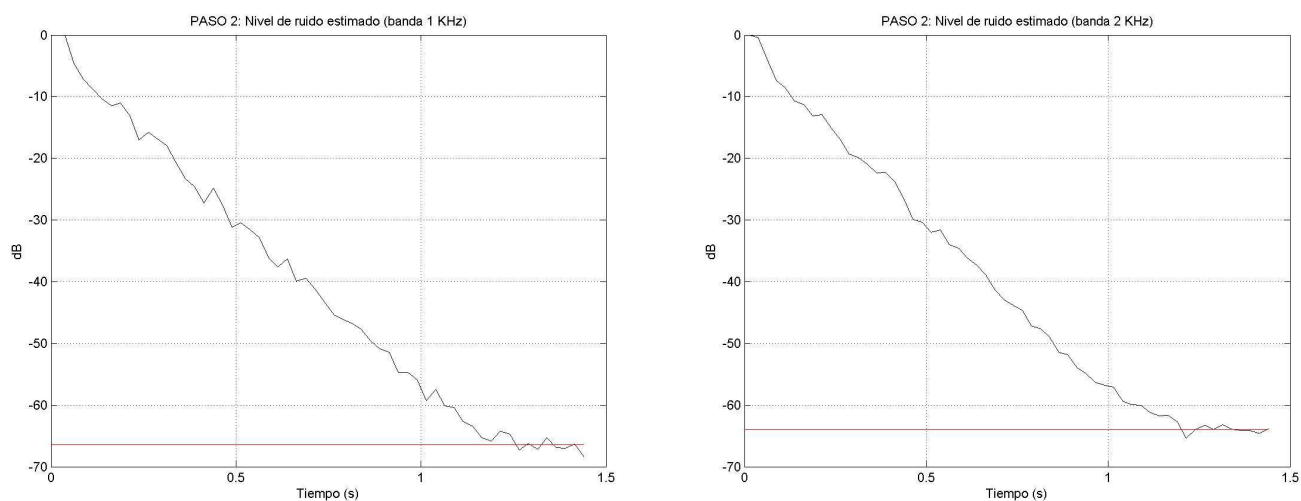


Figura 109. Media y ruido de fondo estimado de las bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz

Para la banda de 1 KHz el ruido tiene un valor de -66,4267 dB.

Para la banda de 2 KHz el ruido tiene un valor de -63,9537 dB.

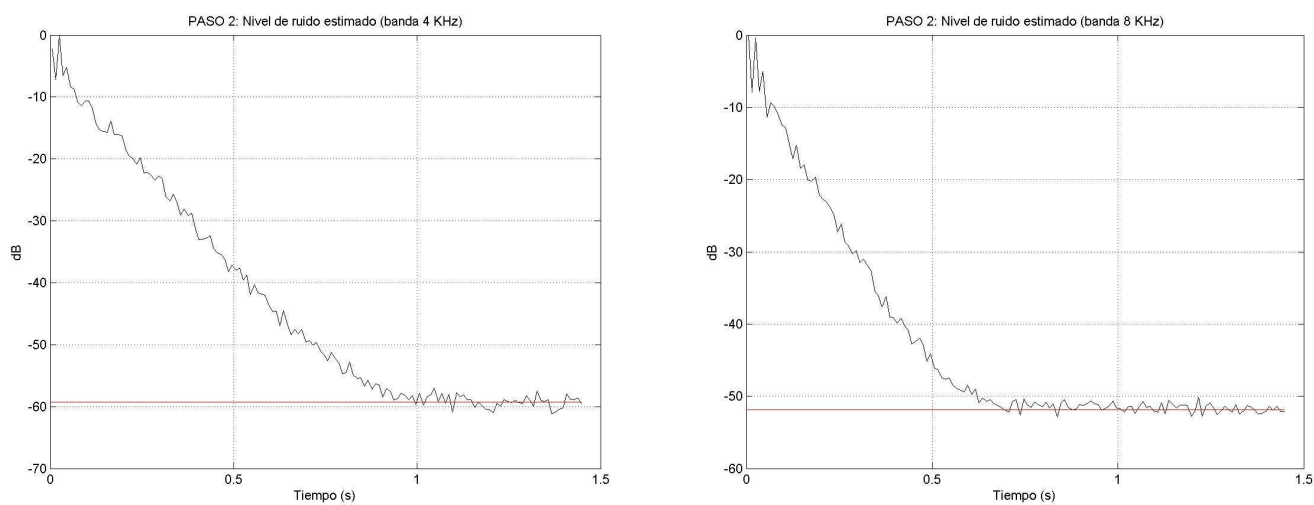


Figura 110. Media y ruido de fondo estimado de la banda centrada en 4 KHz y 8 KHz

Para la banda de 4 KHz el ruido tiene un valor de -59,2296 dB.

Y por último, para la banda de 8 KHz el ruido tiene un valor de -51,8637 dB.

Paso 3: Estimación de la pendiente de decaimiento desde 0 dB hasta el nivel del ruido

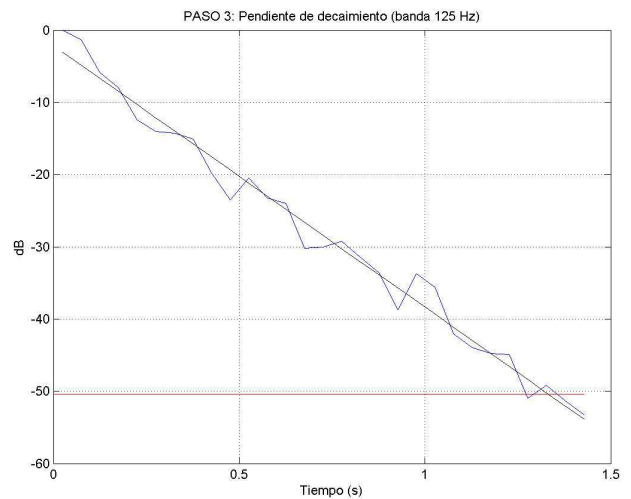
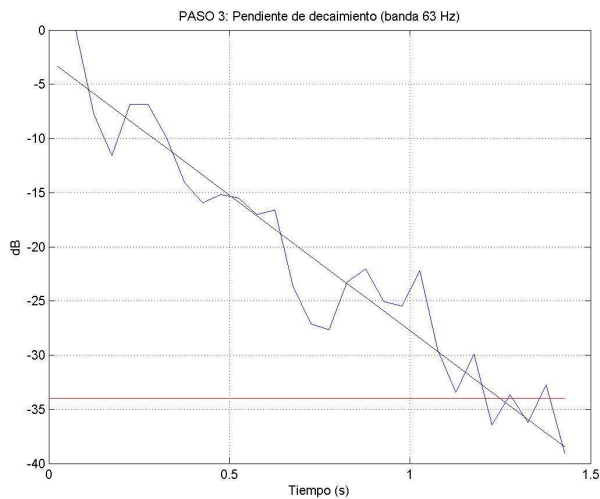


Figura 111. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

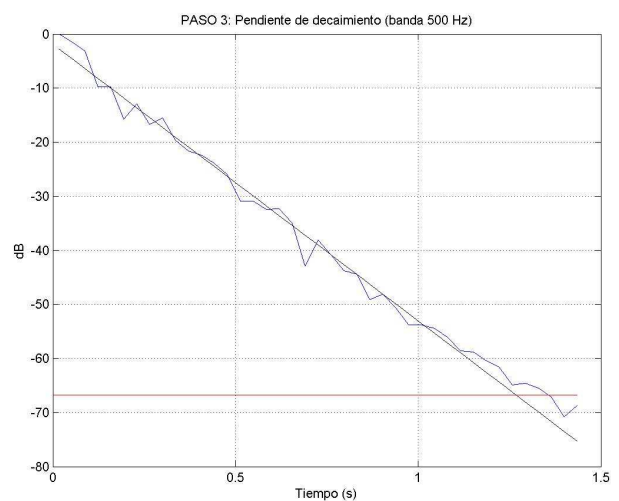
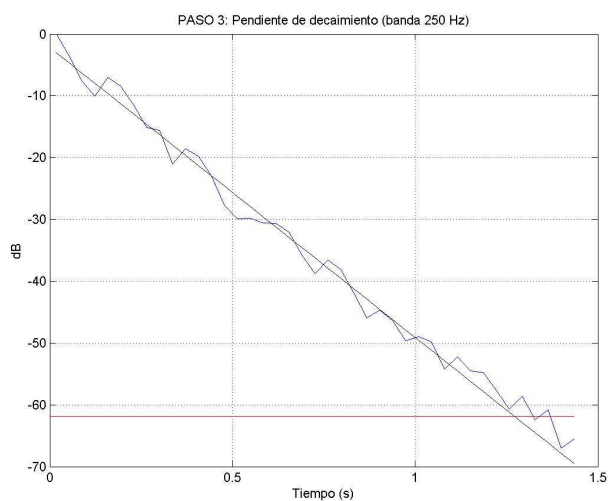


Figura 112. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

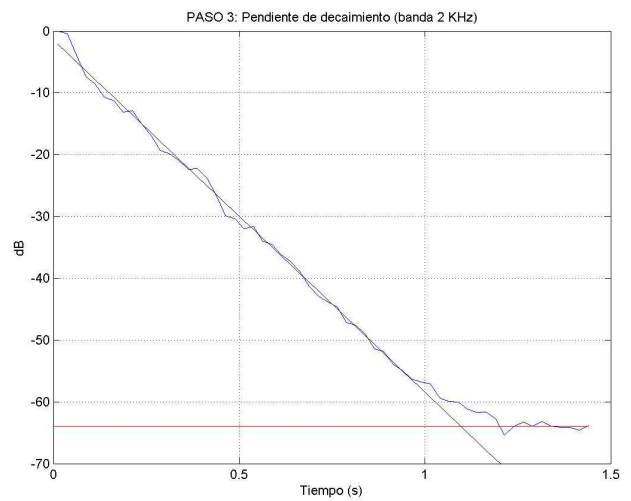
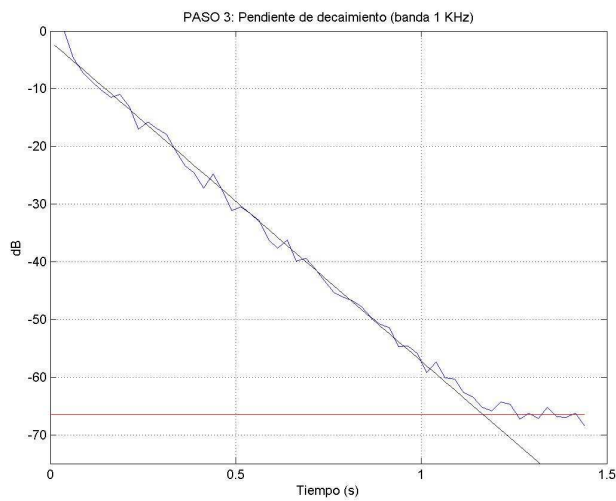


Figura 113. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz

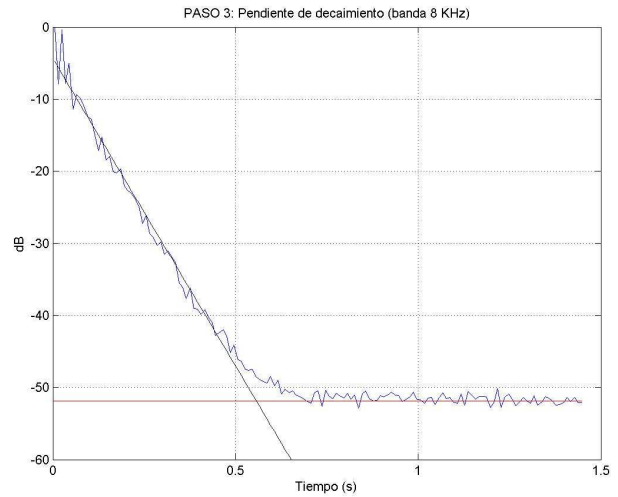
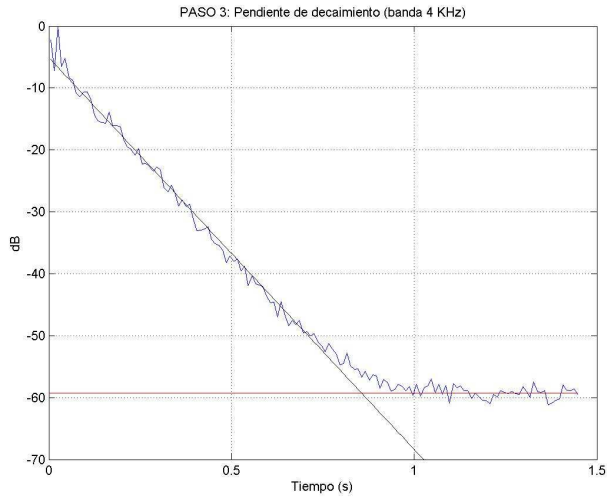


Figura 114. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz

Paso 4: Punto de cruce preliminar

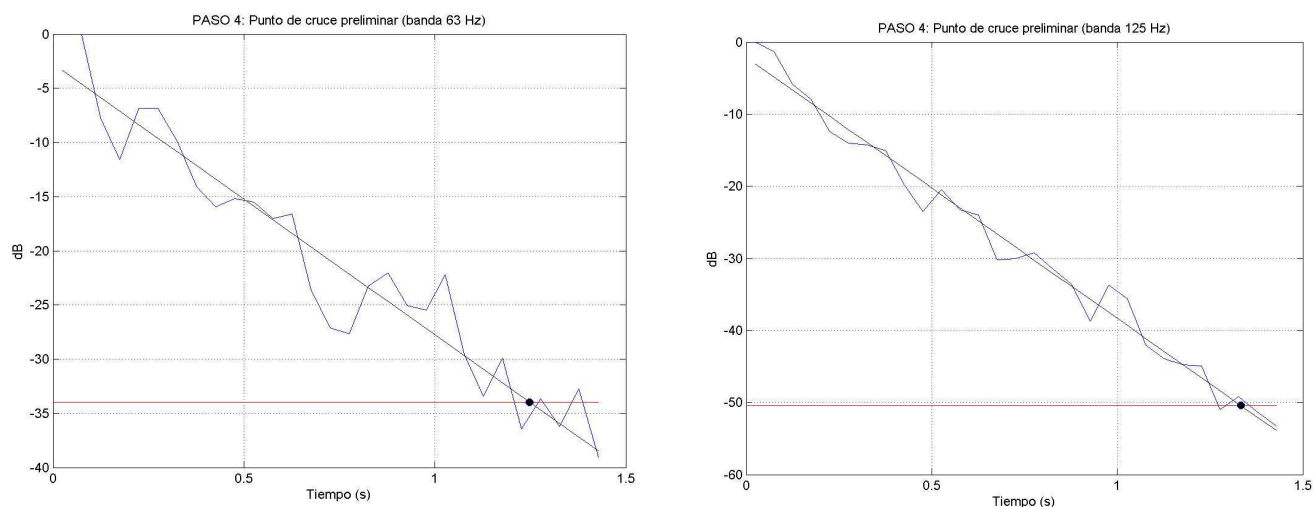


Figura 115. Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas de 63 Hz y 125 Hz

Para la banda de 63 Hz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 59919 (1,25 segundos aproximadamente).

Para la banda de 125 Hz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 63959 (1,33 segundos aproximadamente).

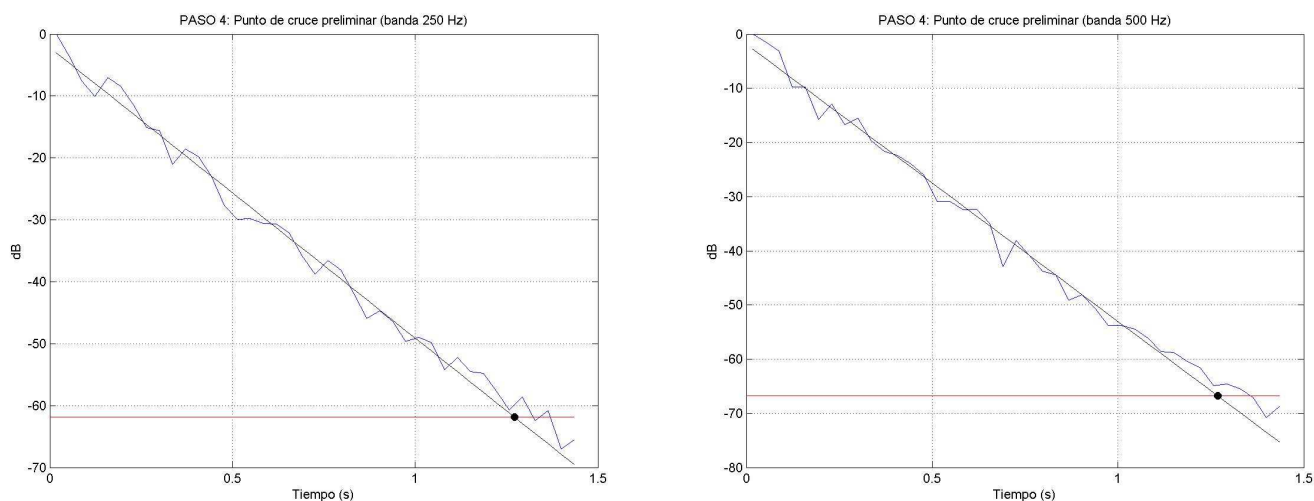


Figura 116. Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas de 250 Hz y 500 Hz

Para la banda de 250 Hz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 61035 (1,27 segundos aproximadamente).

Para la banda de 500 Hz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 60923 (1,27 segundos aproximadamente).

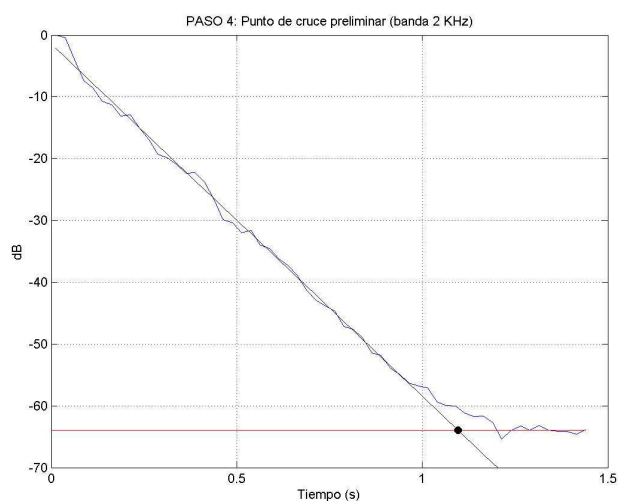
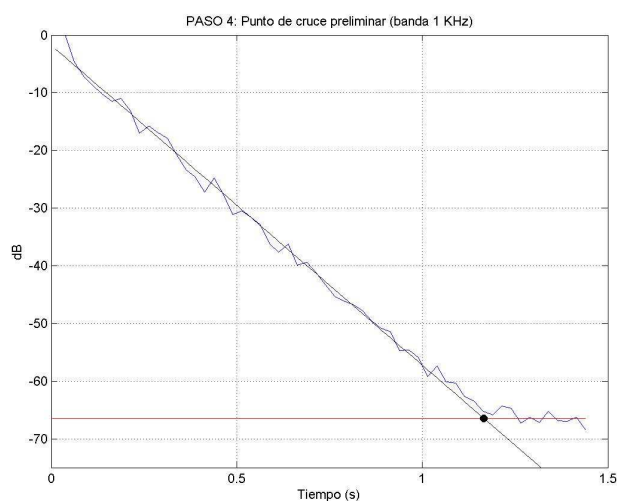


Figura 117. Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas de 1 KHz y 2 KHz

Para la banda de 1 KHz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 55932 (1,16 segundos aproximadamente).

Para la banda de 2 KHz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 52648 (1,1 segundos aproximadamente).

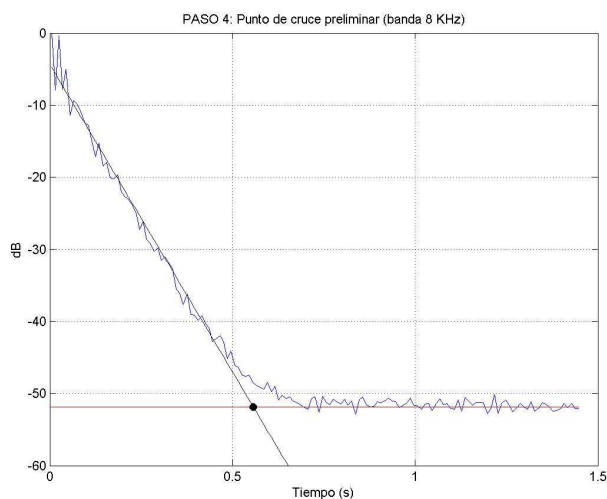
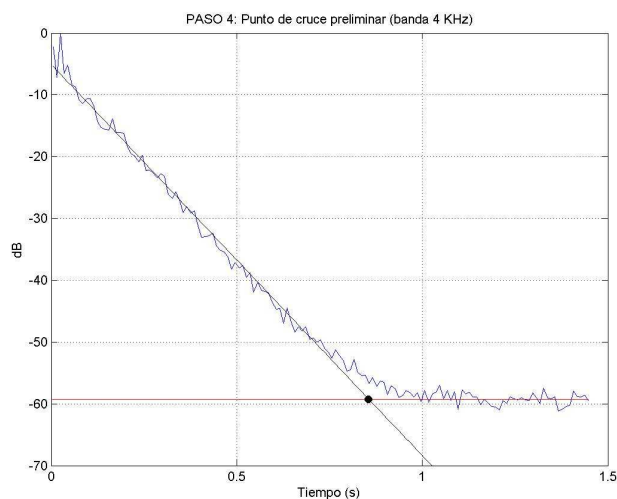


Figura 118. Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz

Para la banda de 4 KHz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 41064 (0,85 segundos aproximadamente).

Para la banda de 8 KHz el punto de truncamiento preliminar se halla en la muestra 26738 (0,56 segundos aproximadamente).

Paso 6: Promediado del cuadrado de la respuesta impulsiva en los nuevos intervalos de tiempo

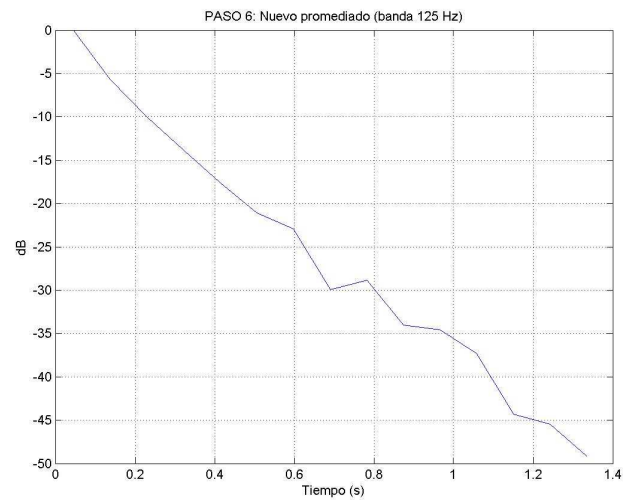
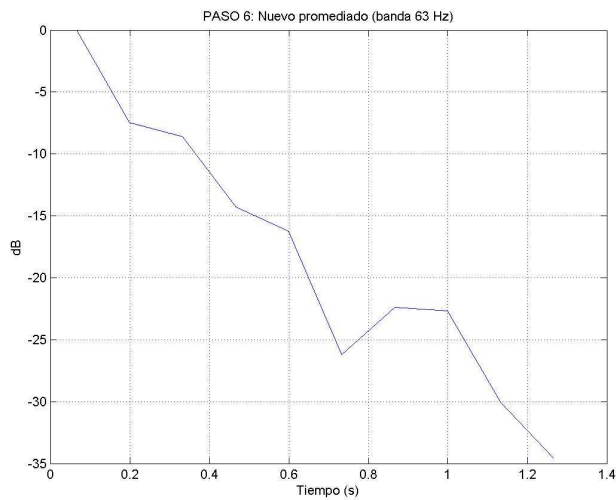


Figura 119. Envolvente de las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

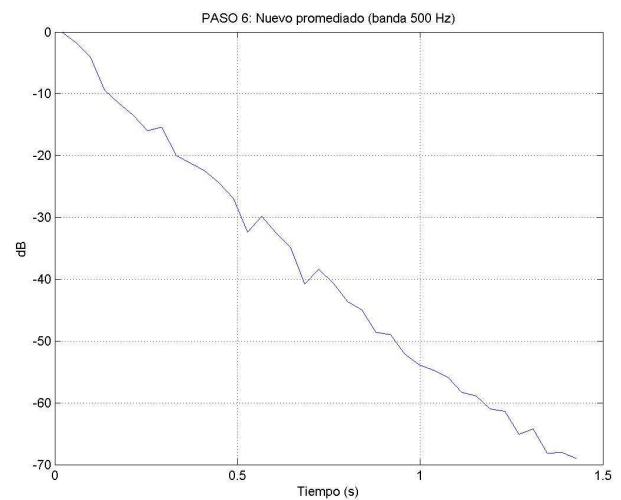
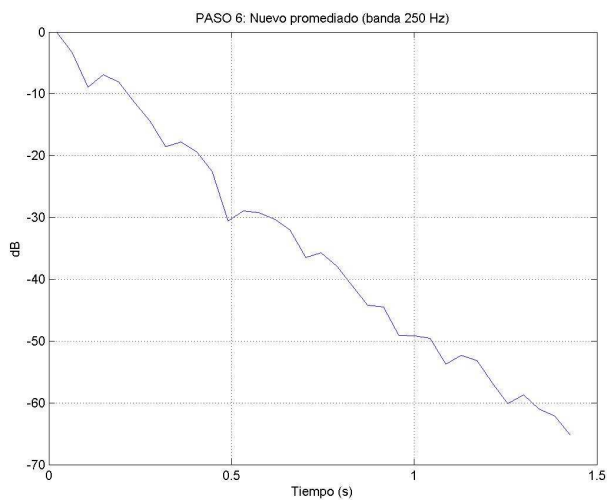


Figura 120. Envolvente de las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

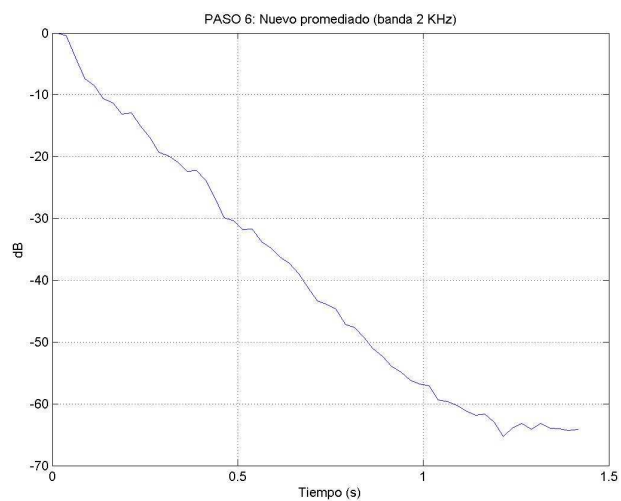
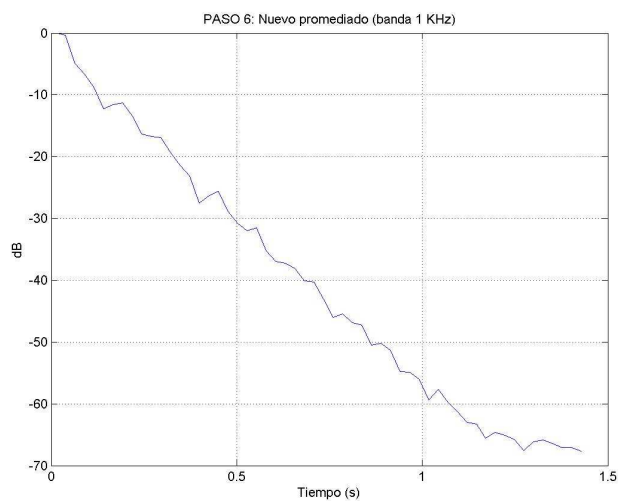


Figura 121. Envolvente de las bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz

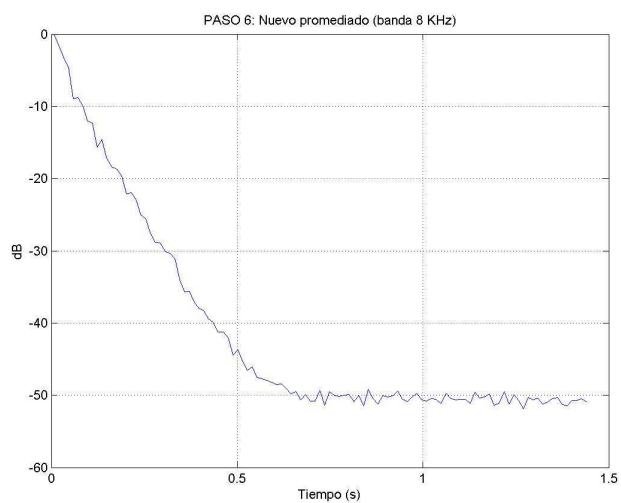
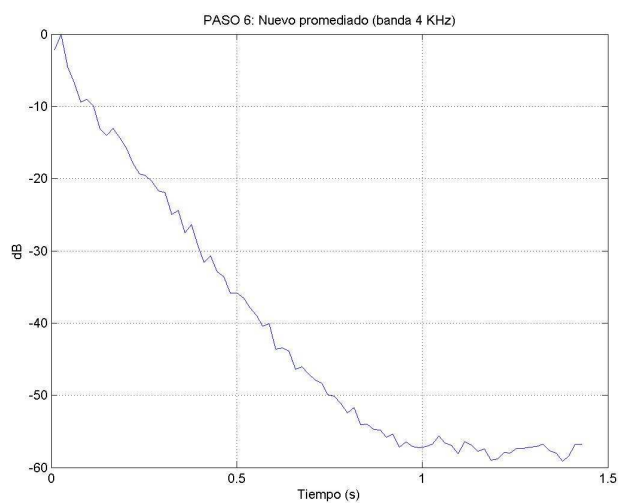


Figura 122. Envolvente de las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz

Paso 7: Estimación del nivel del ruido de fondo

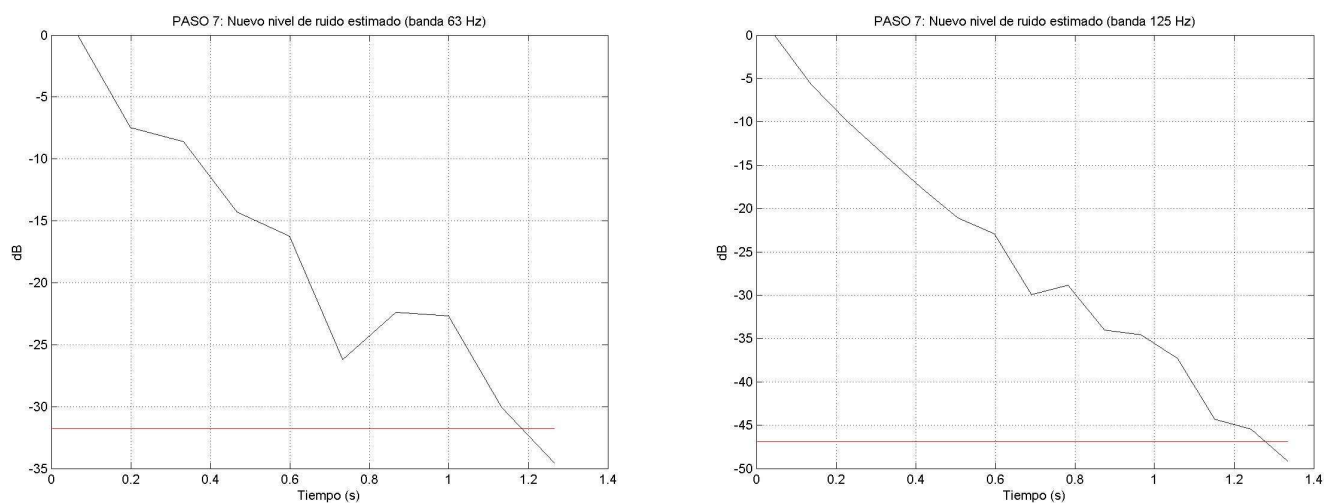


Figura 123. Media y ruido de las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

Para la banda de 63 Hz el ruido de fondo estimado en la última iteración tiene un nivel de -31,7601 dB.

Para la banda de 125 Hz el nivel de ruido es de -46,9273 dB.

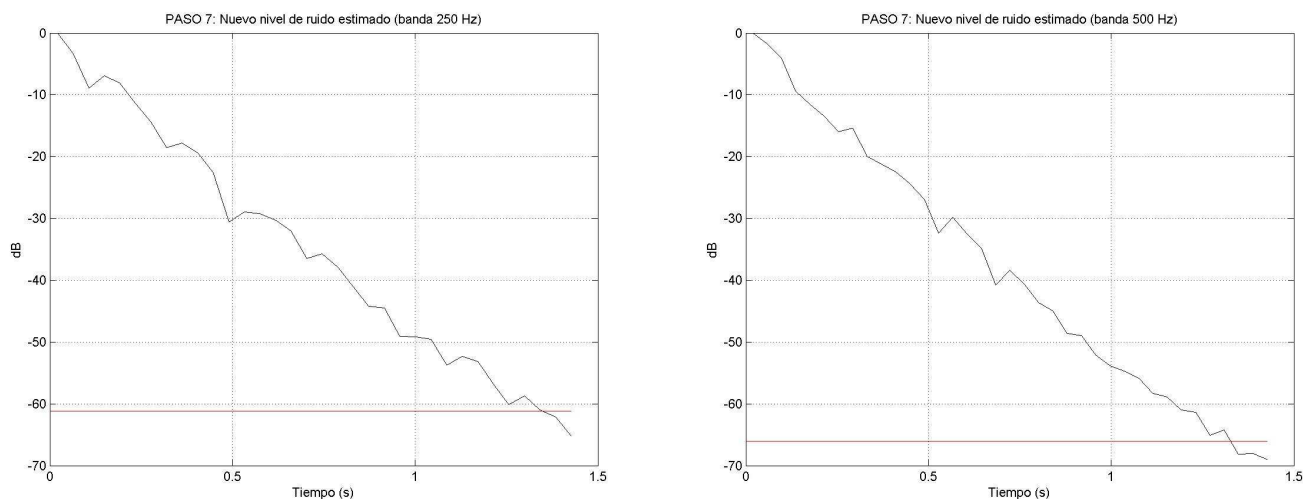


Figura 124. Media y ruido de las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

Para la banda de 250 Hz el nivel de ruido de fondo es de -61,1774 dB.

Para la banda de 500 Hz el nivel de ruido de fondo es de -66,0239 dB.

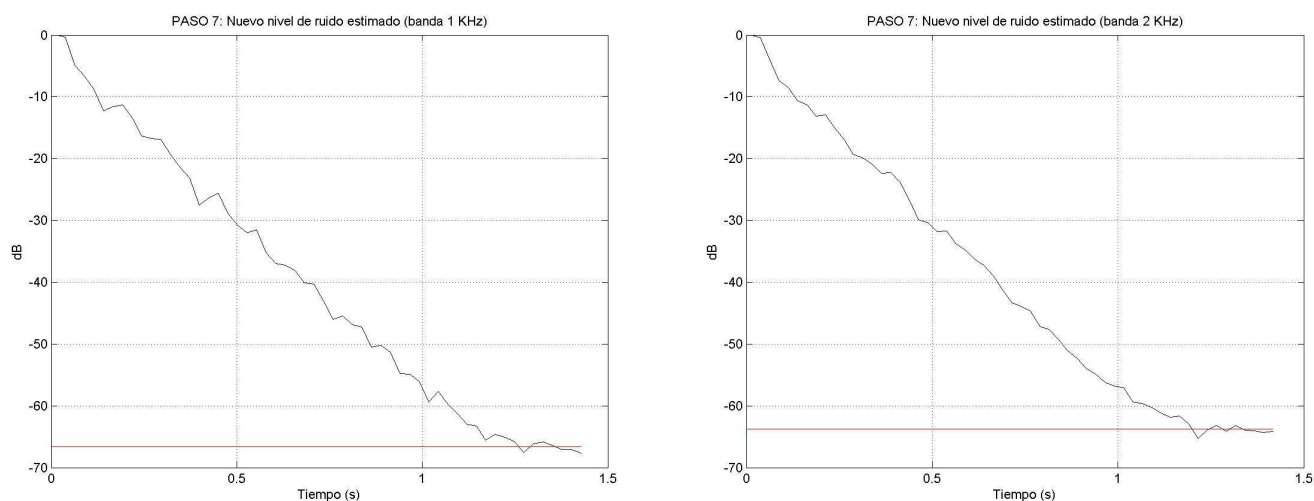


Figura 125. Media y ruido de las bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz

Para la banda de 1 KHz el nivel de ruido es de -66,6455 dB.

Para la banda de 2 KHz el nivel de ruido de fondo es de -63,7691 dB.

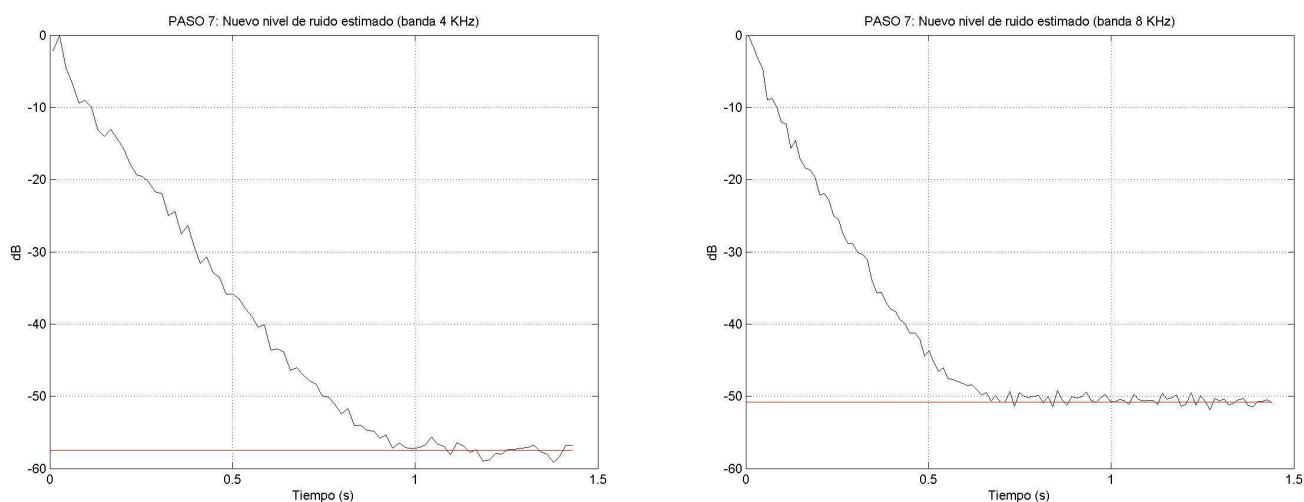


Figura 126. Media y ruido de las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz

Para la banda de 4 KHz el nivel de ruido de fondo es de -57,4662 dB.

Y por último para la banda de 8 KHz el nivel de ruido es de -50,7788 dB

Paso 8: Estimación de la caída tardía de la pendiente

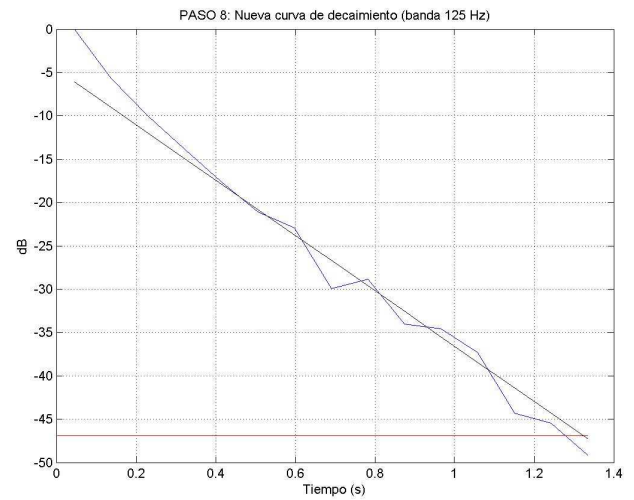
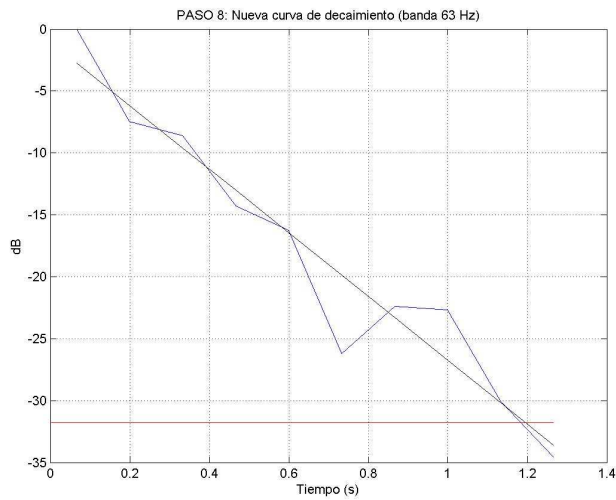


Figura 127. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

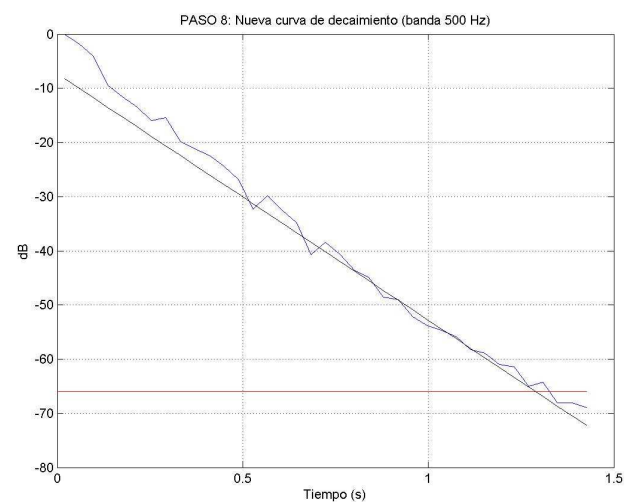
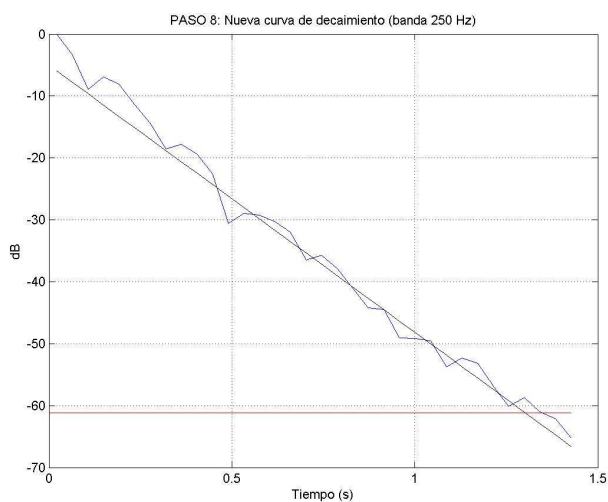


Figura 128. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

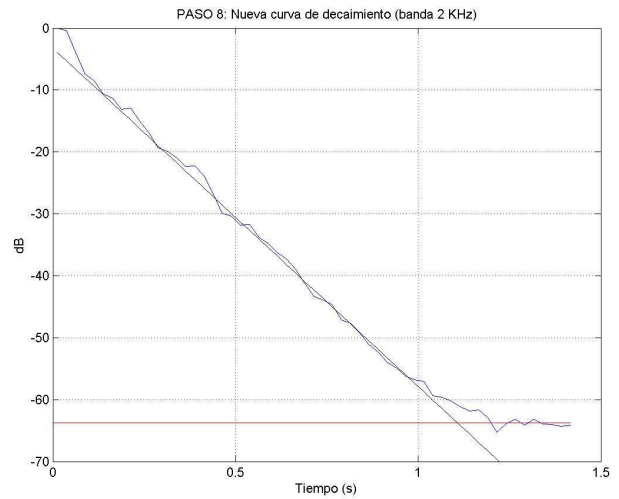
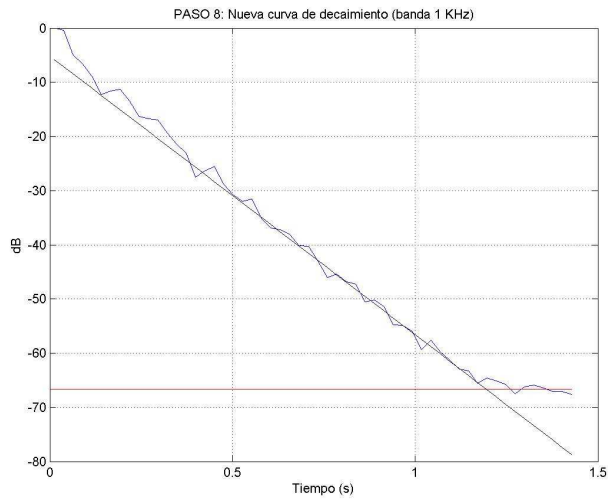


Figura 129. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 1 KHz y 2 KHz

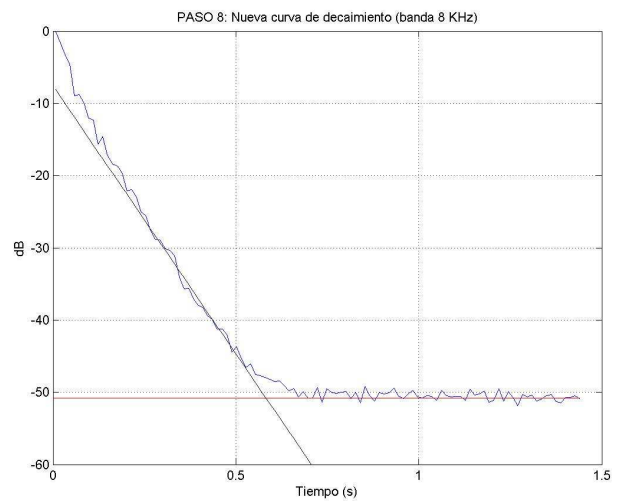
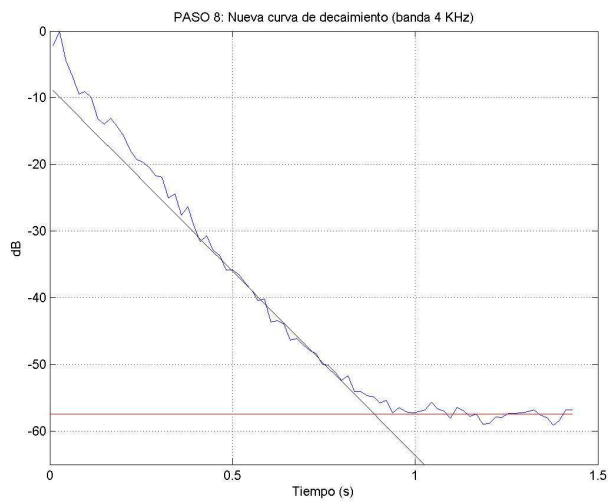


Figura 130. Media, ruido y pendiente de las bandas centradas en 4 KHz y 8 KHz

Paso 9: Punto de truncamiento

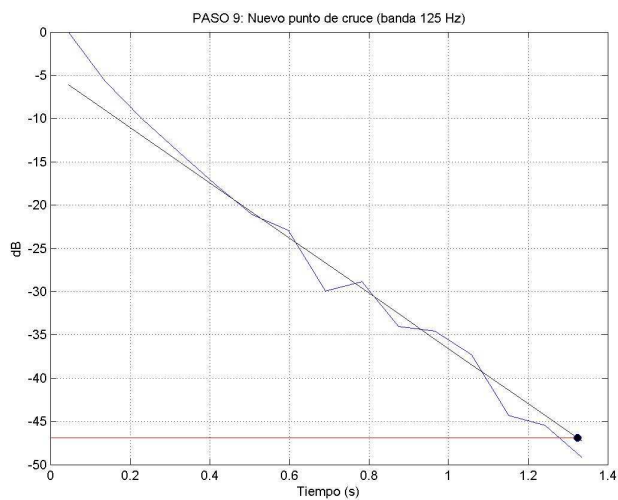
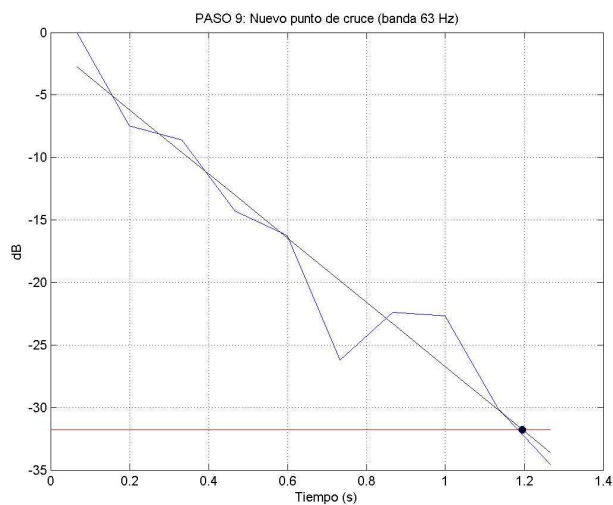


Figura 131. Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas de 63 Hz y 125 Hz

Para la banda de 63 Hz el punto de truncamiento se halla en la muestra 57358 (1,2 segundos aproximadamente).

Para la banda de 125 Hz el punto de truncamiento se halla en la muestra 63590 (1,32 segundos aproximadamente).

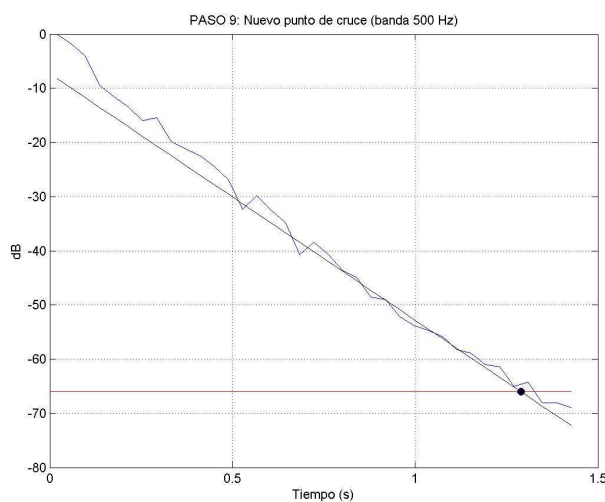
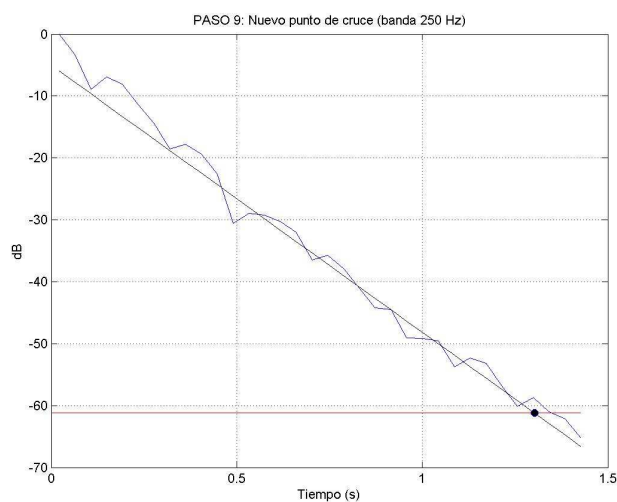


Figura 132. Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas de 250 Hz y 500 Hz

Para la banda de 250 Hz el punto de truncamiento se halla en la muestra 62497 (1,3 segundos aproximadamente).

Para la banda de 500 Hz el punto de truncamiento se halla en la muestra 61908 (1,29 segundos aproximadamente).

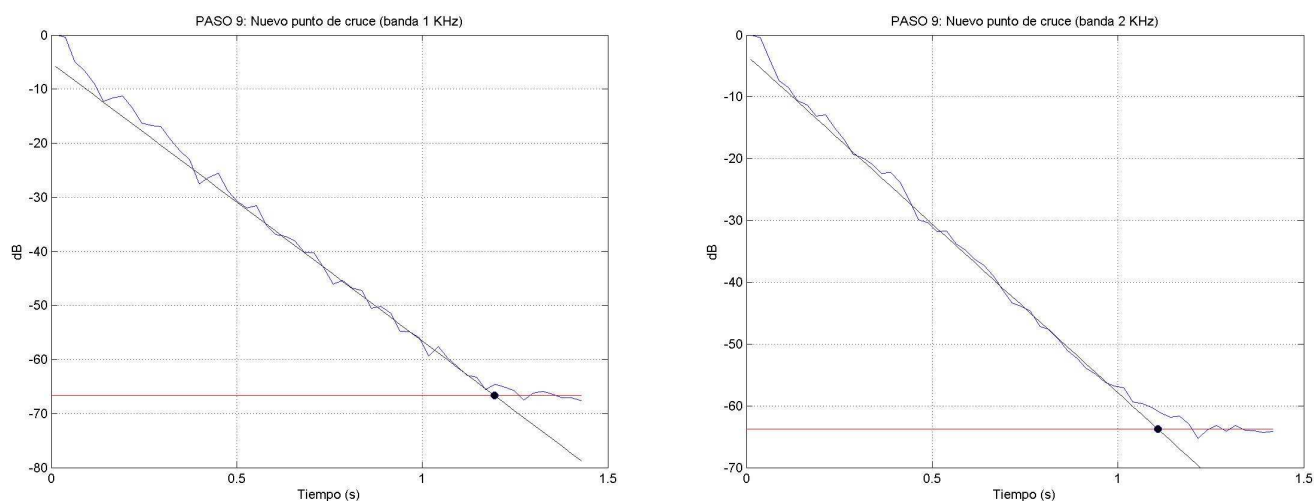


Figura 133. Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas de 1 KHz y 2 KHz

Para la banda de 1 KHz el punto de truncamiento se halla en la muestra 57324 (1,2 segundos aproximadamente).

Para la banda de 2 KHz el punto de truncamiento se halla en la muestra 53161 (1,1 segundos aproximadamente).

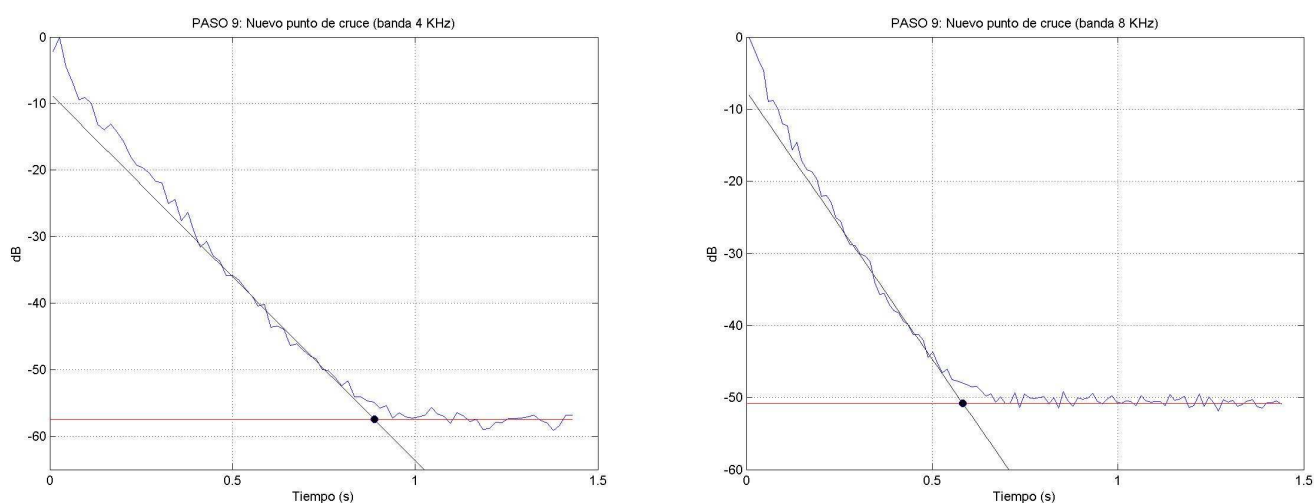


Figura 134 Media, ruido, pendiente y punto de cruce de las bandas de 4 KHz y 8 KHz

Para la banda de 4 KHz el punto de truncamiento se halla en la muestra 42641 (0,88 segundos aproximadamente).

Y por último, para la banda de 8 KHz el punto de truncamiento se halla en la muestra 27945 (0,6 segundos aproximadamente).

ANEXO C. Energía de compensación

Se presentan las curvas, en escala lineal, correspondientes a la energía de compensación que se aplica a cada banda de octava.

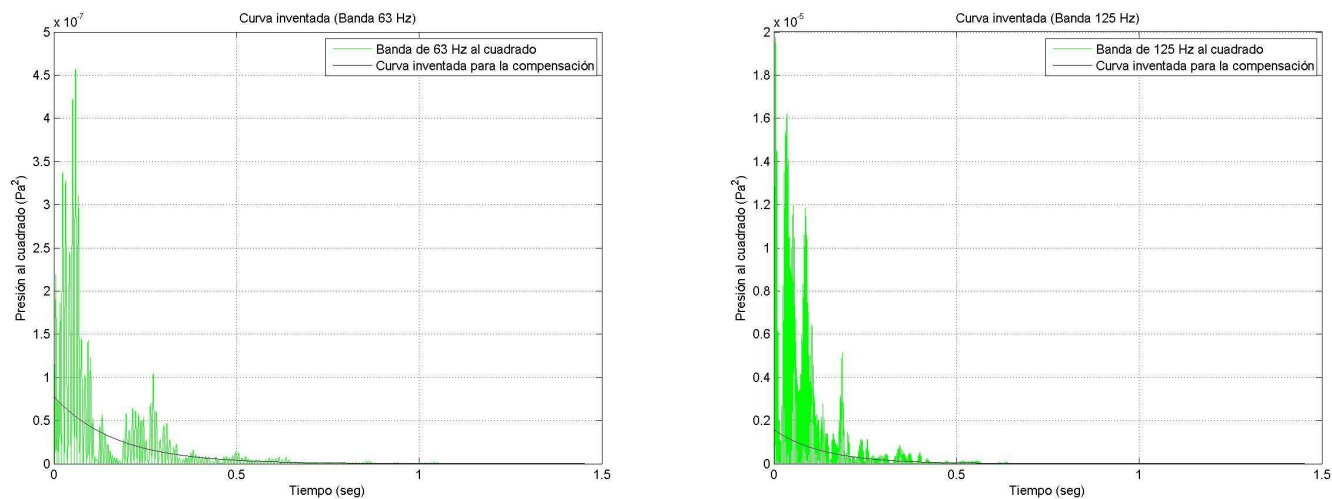


Figura 135. Bandas centradas en 63 Hz y 125 Hz

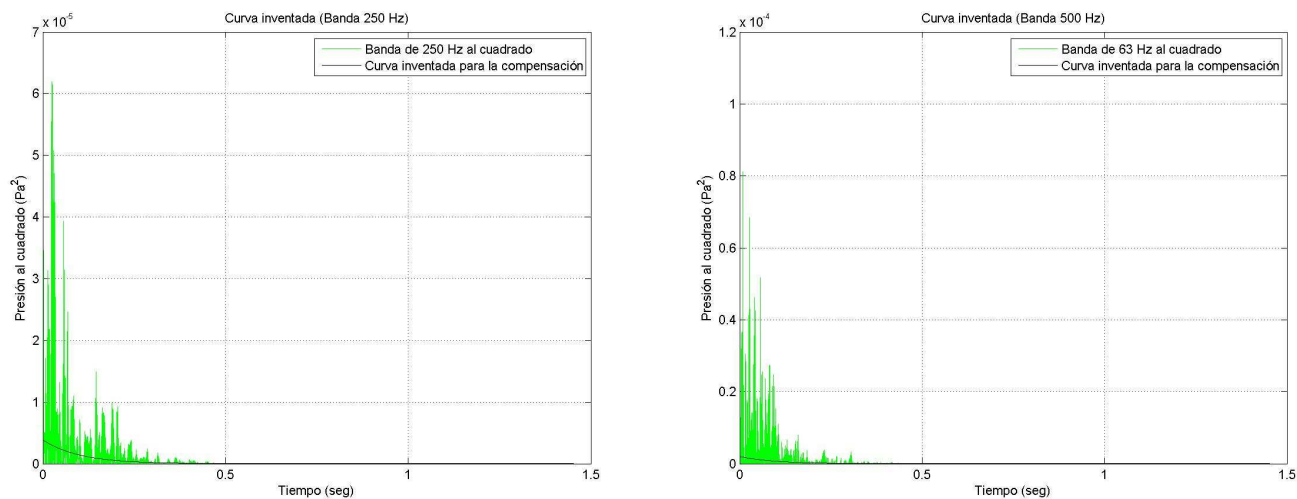
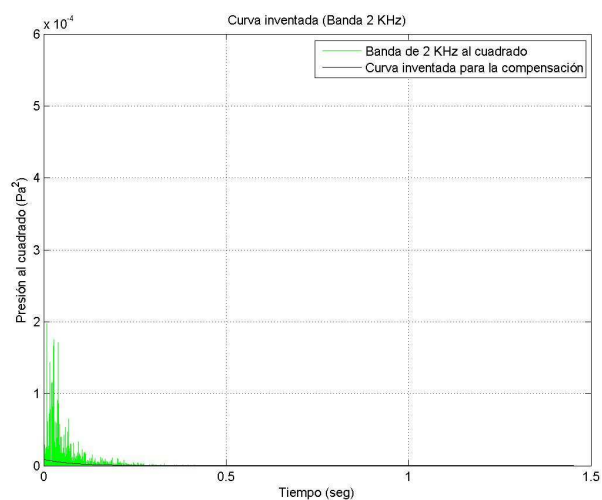
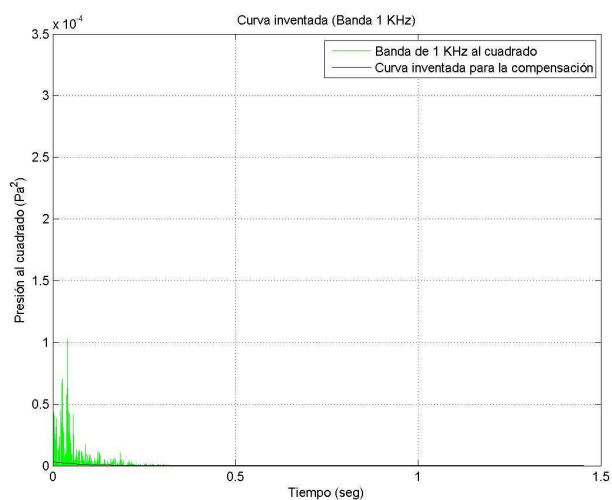
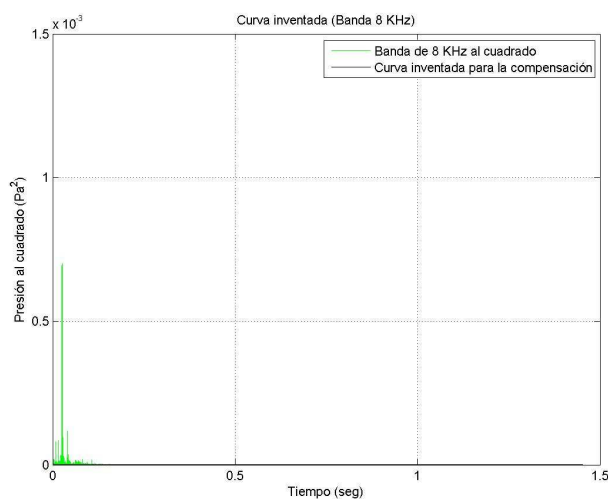
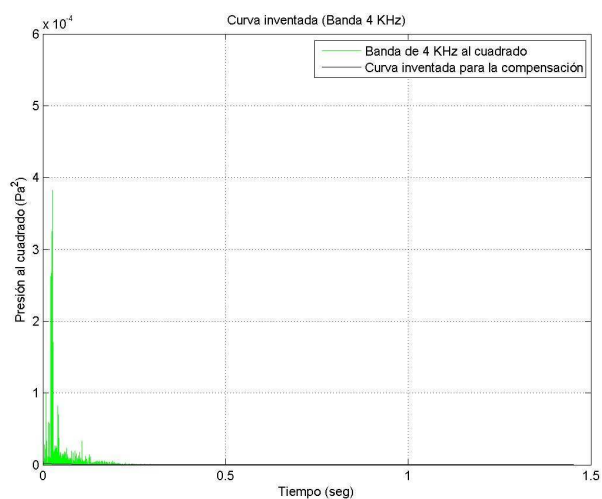


Figura 136. Bandas centradas en 250 Hz y 500 Hz

**Figura 137. Banda centradas en 1 KHz y 2 KHz****Figura 138. Banda centradas en 4 KHz y 8 KHz**

ANEXO D. Análisis genérico del software

En los siguientes apartados se describe el comportamiento de diferentes señales captadas por el programa *WinMLS* frente al algoritmo diseñado en el *Método 1*. Se realiza la comparativa de este método, por que el *WinMLS* desarrolla sus cálculos considerando como primer procedimiento el inventanado de la señal en banda ancha.

Se presentan las gráficas correspondientes a la captura de la respuesta impulsiva en banda ancha y las gráficas correspondientes a las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava. Posteriormente se expone gráficamente los resultados obtenidos frente a los proporcionados por *WinMLS*.

Teatro Gayarre

Se realiza el estudio de dos señales diferentes captadas en el *Teatro Gayarre* con un TR_{mid} de 1 segundo.

Señal “Omni_MultiCh1_7GT1_S1R6”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

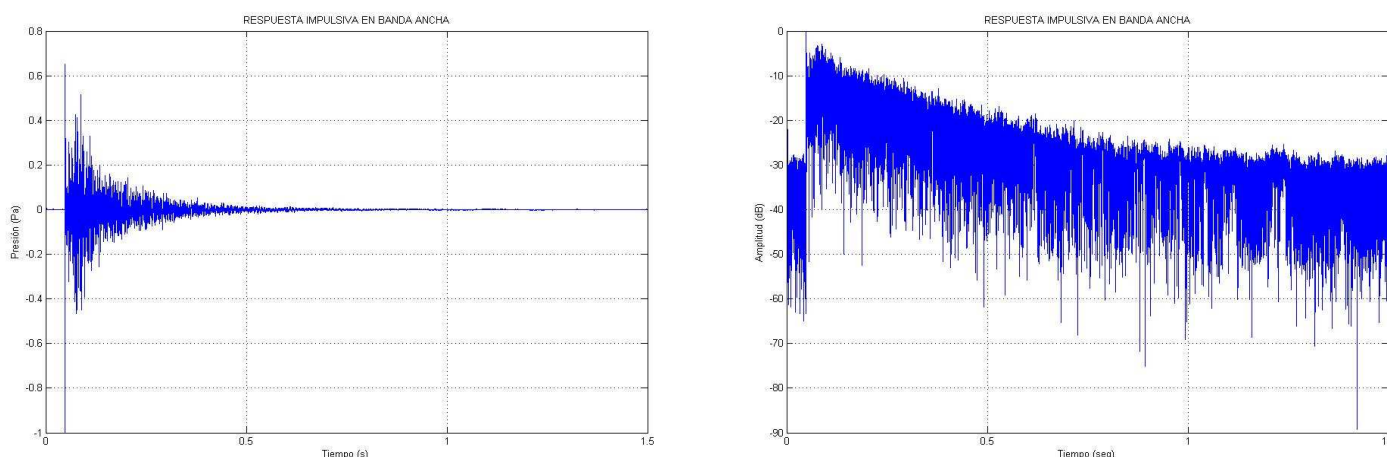


Figura 139. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

Como observación interesante, a continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

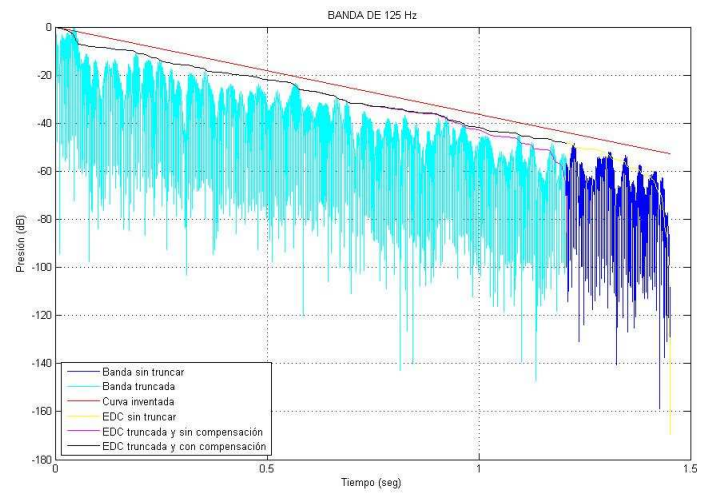
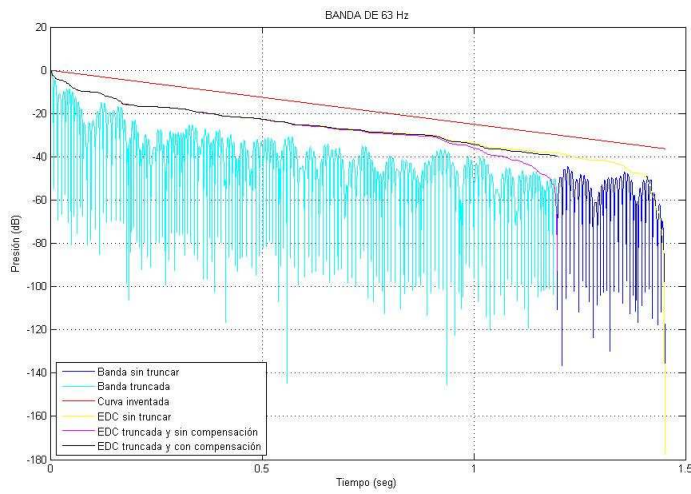


Figura 140. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

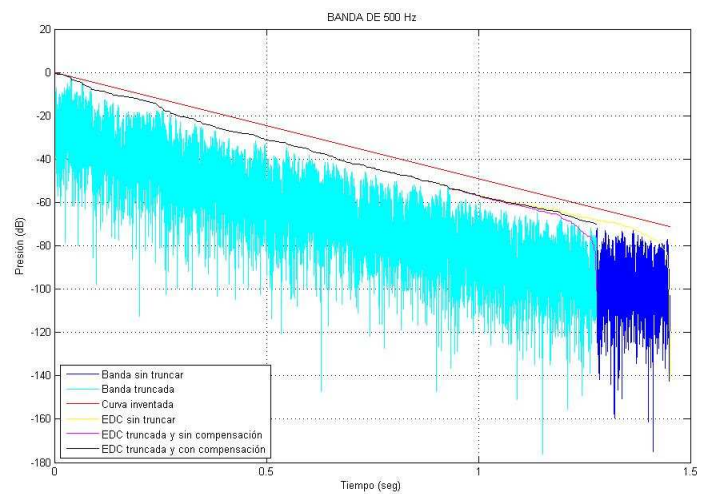
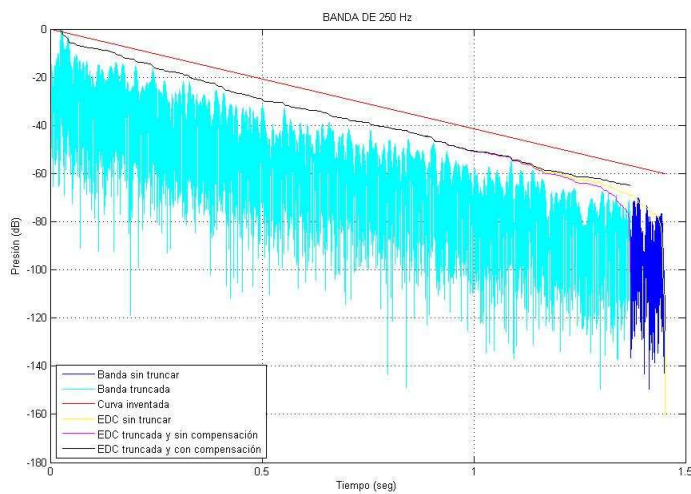


Figura 141. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

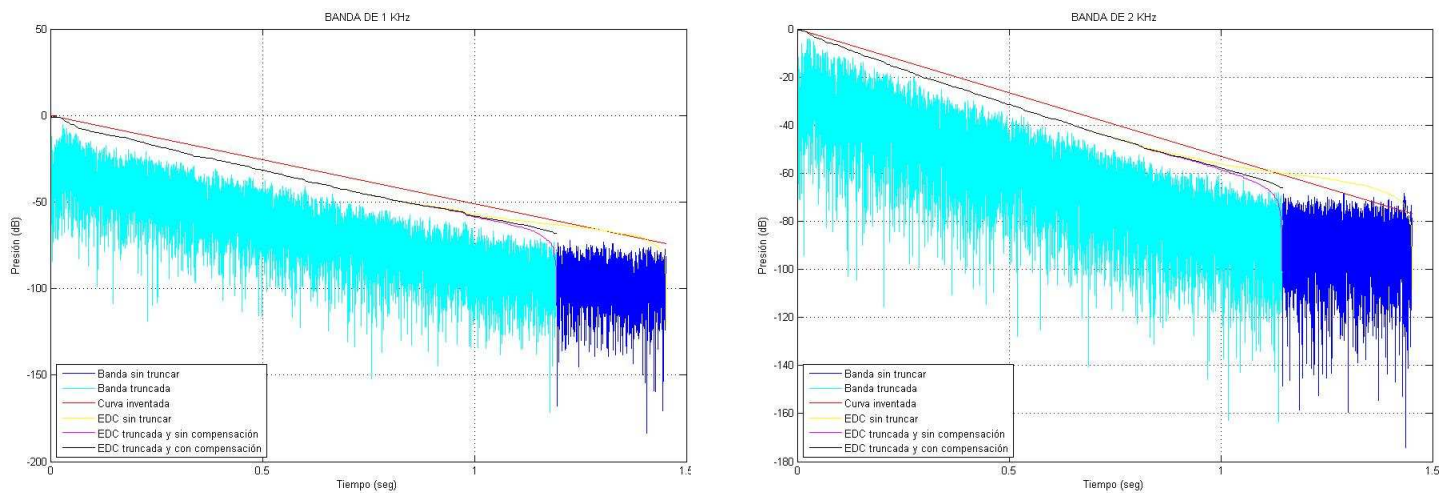


Figura 142. Curvas de decaimiento energético, banda de 1 KHz y 2 KHz

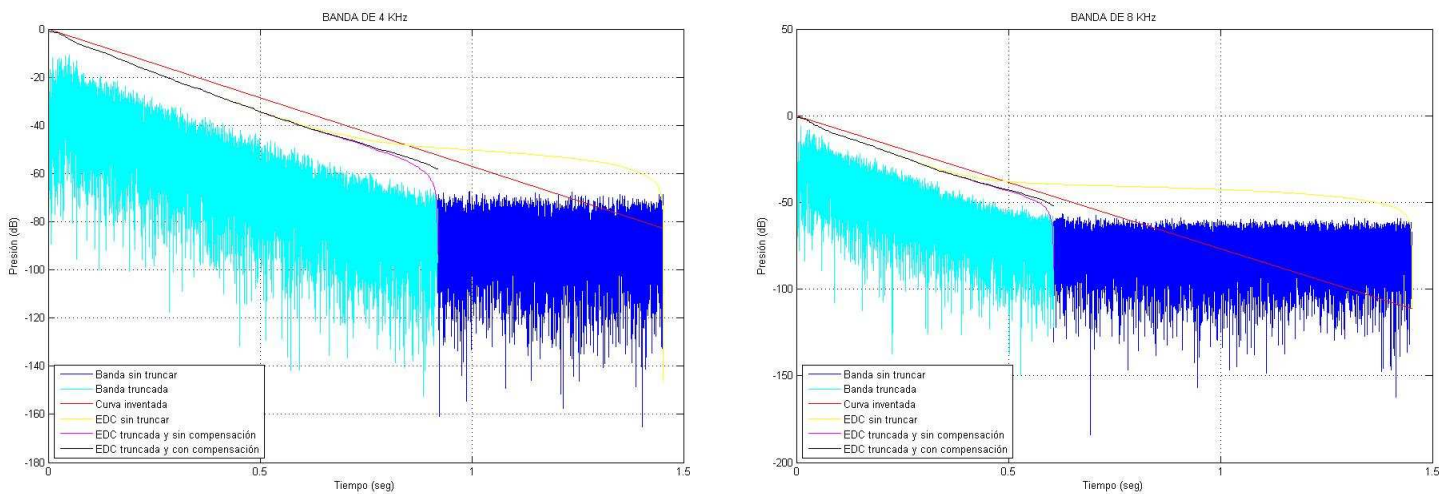


Figura 143. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada sin considerar la energía de compensación.

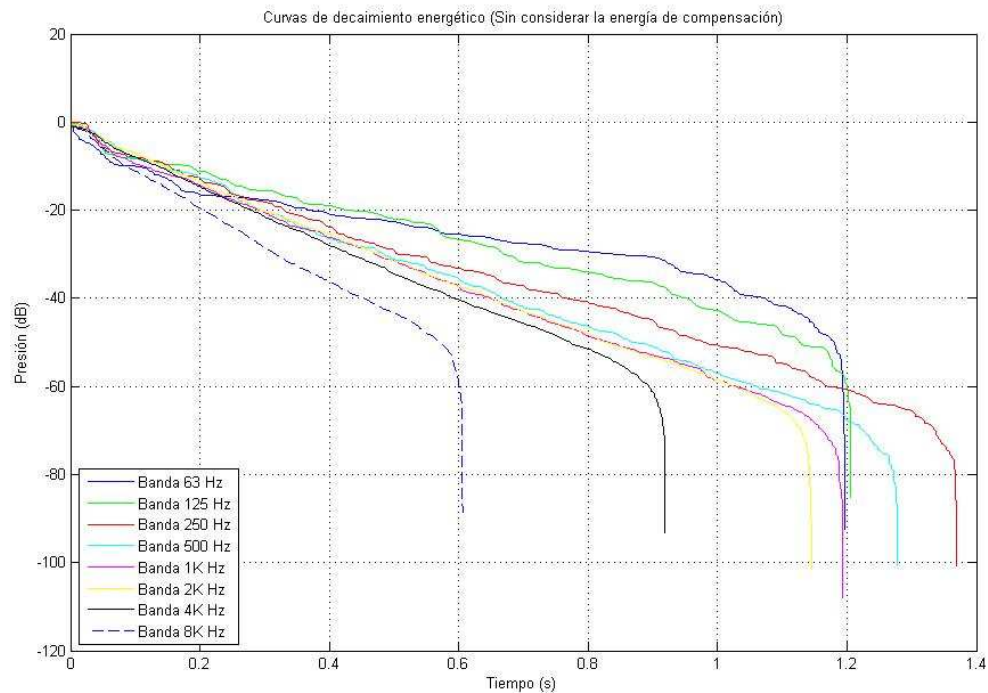


Figura 144. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

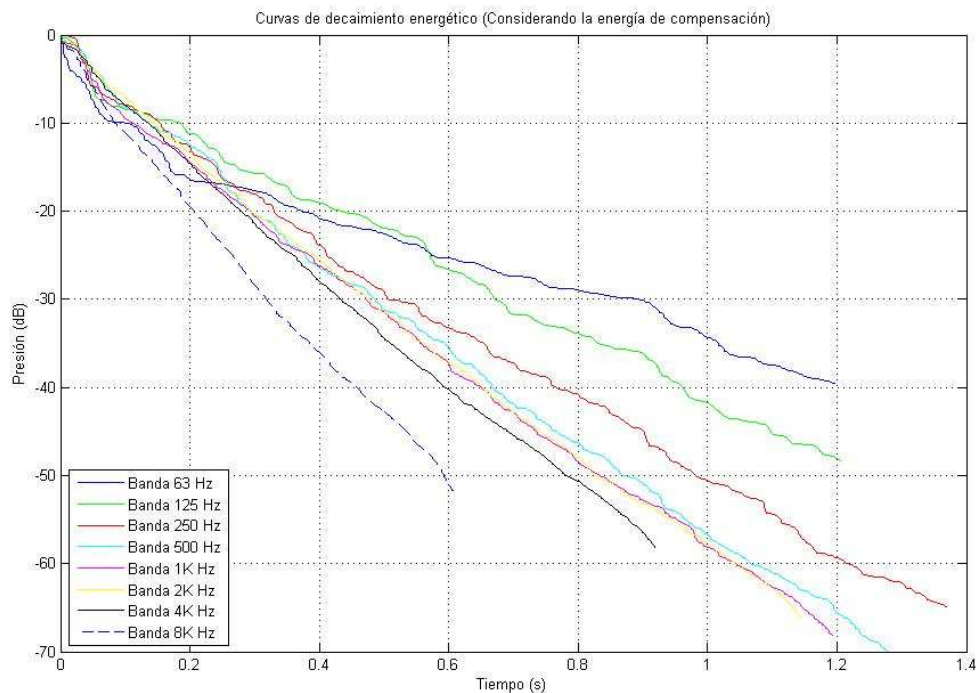


Figura 145. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

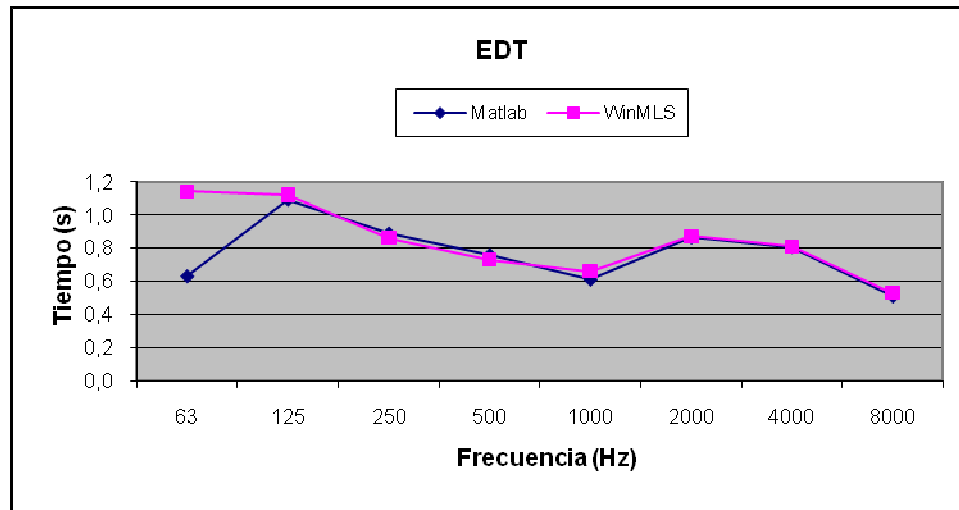


Figura 146. Comparativa EDT

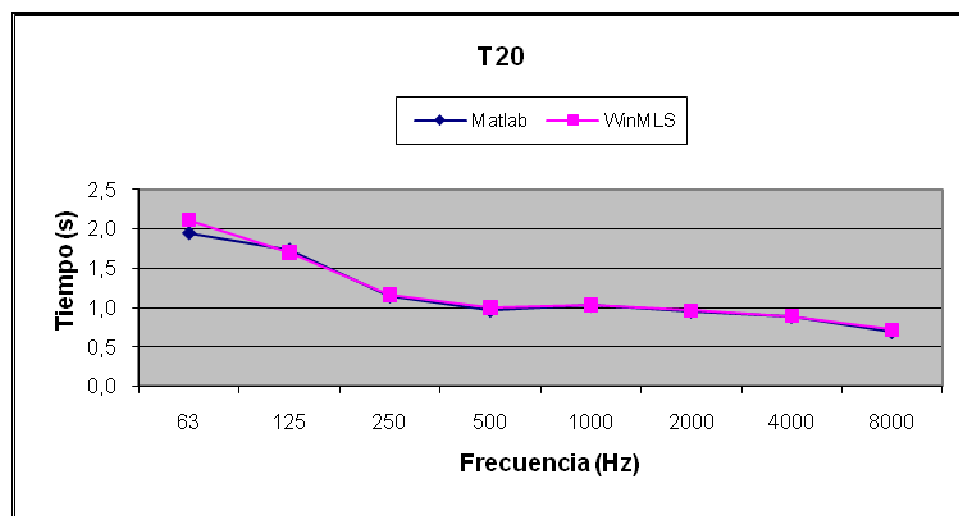


Figura 147. Comparativa T20

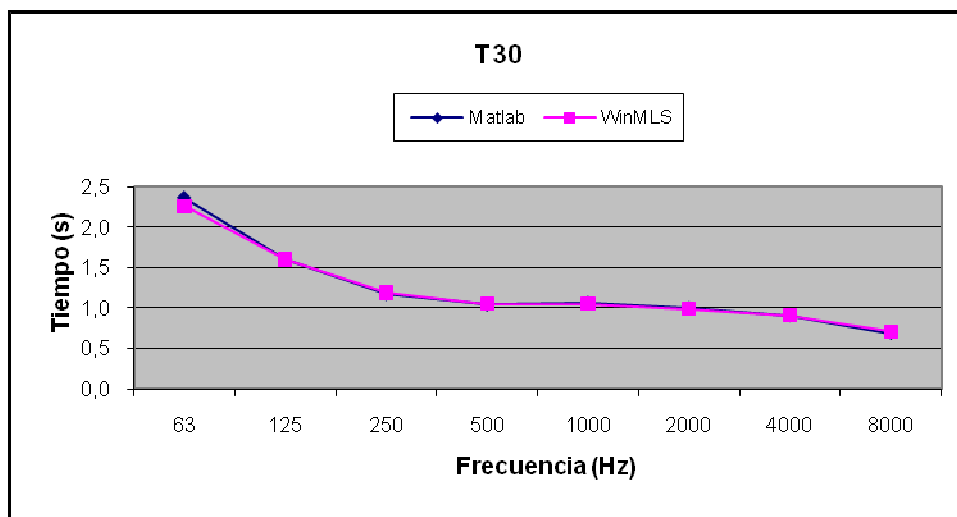


Figura 148. Comparativa T30

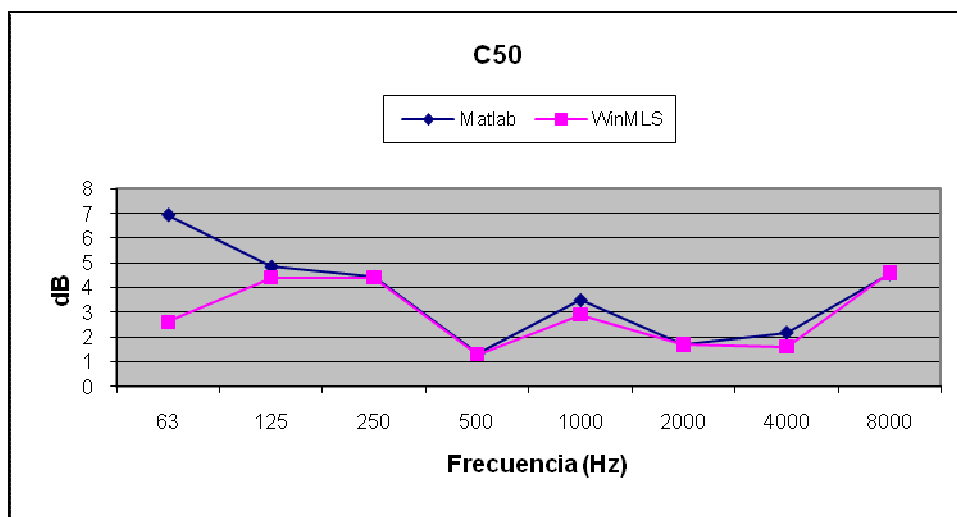


Figura 149. Comparativa C50

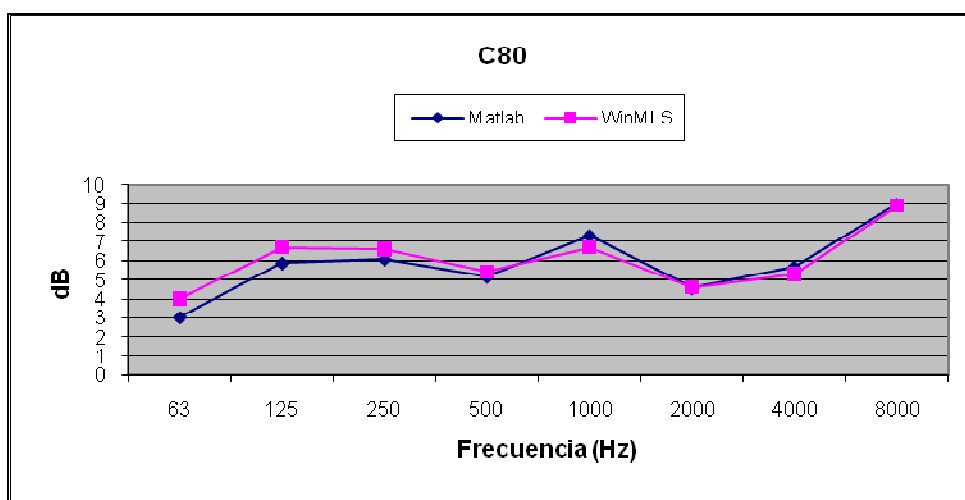


Figura 150. Comparativa C80

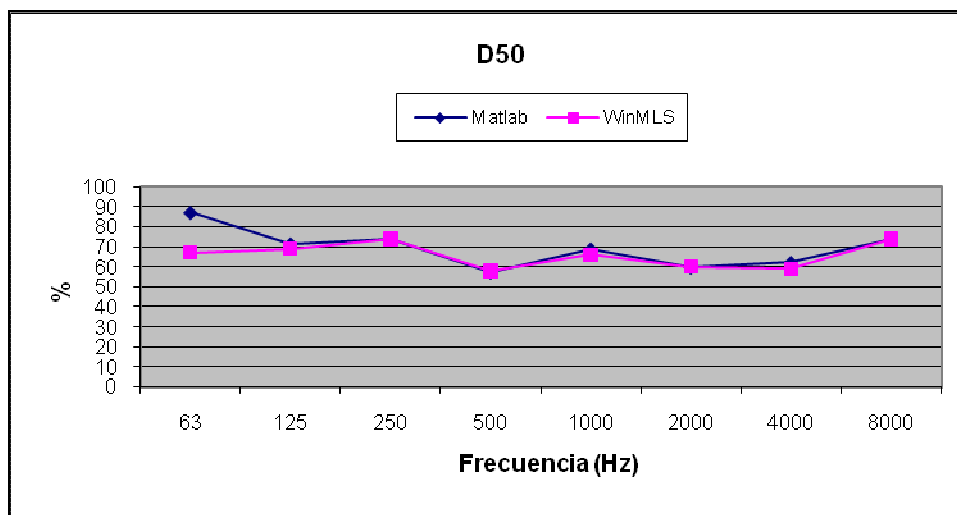


Figura 151. Comparativa D50

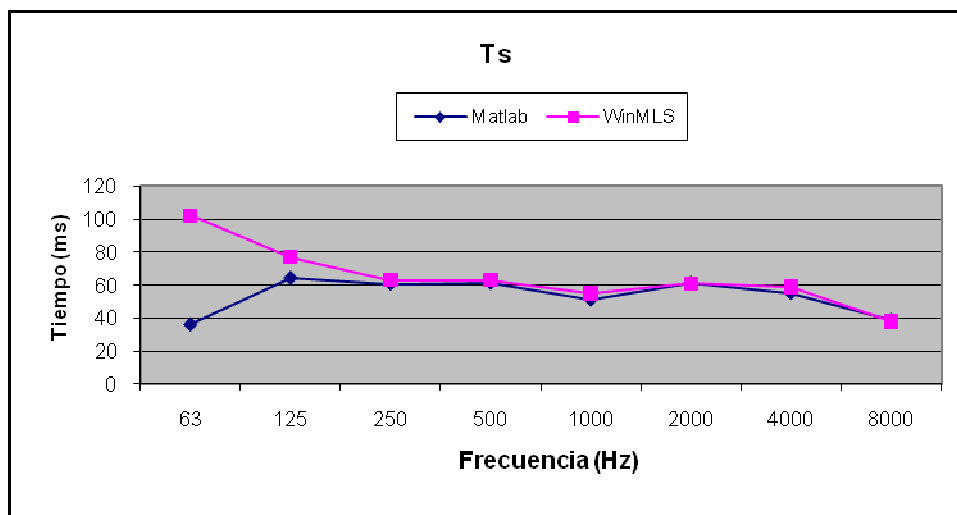


Figura 152. Comparativa Ts

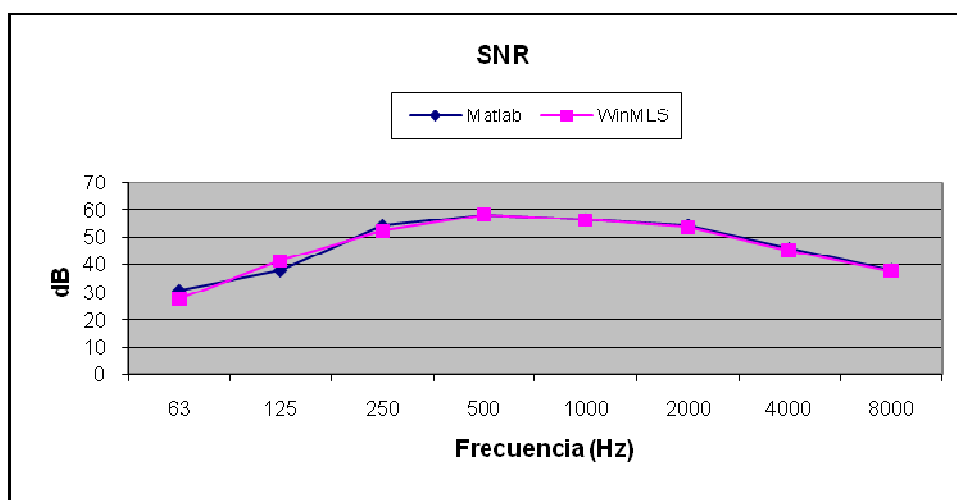


Figura 153. Comparativa SNR

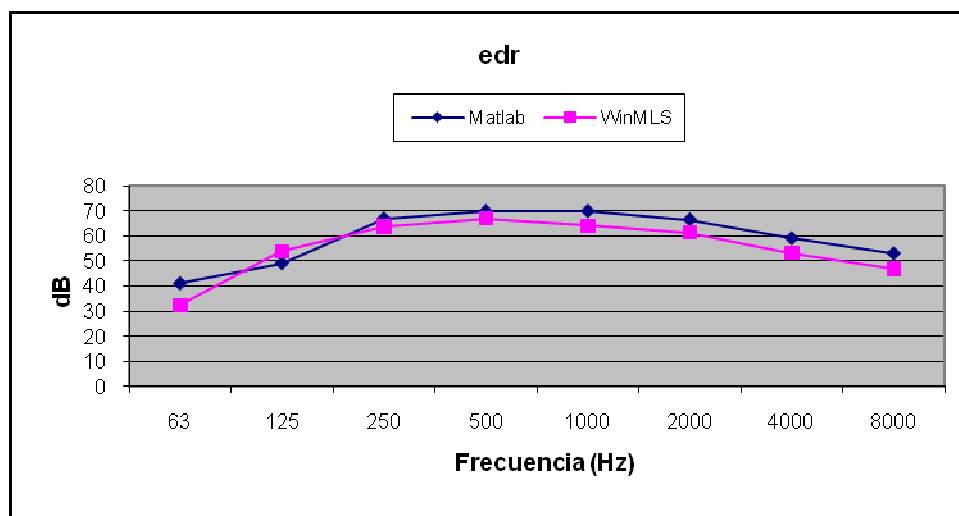


Figura 154. Comparativa edr

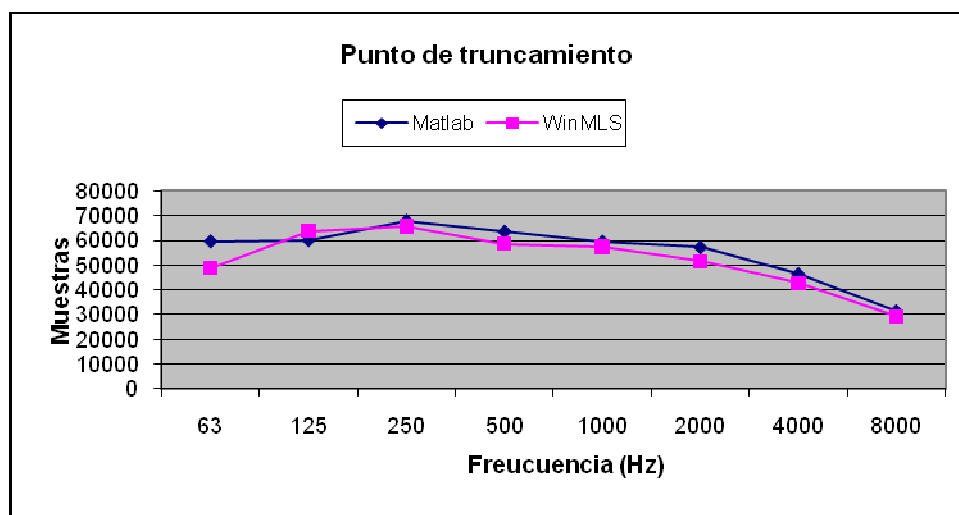


Figura 155. Comparativa punto de truncamiento

Señal “Omni_MultiCh1_8GT1_S1R12”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

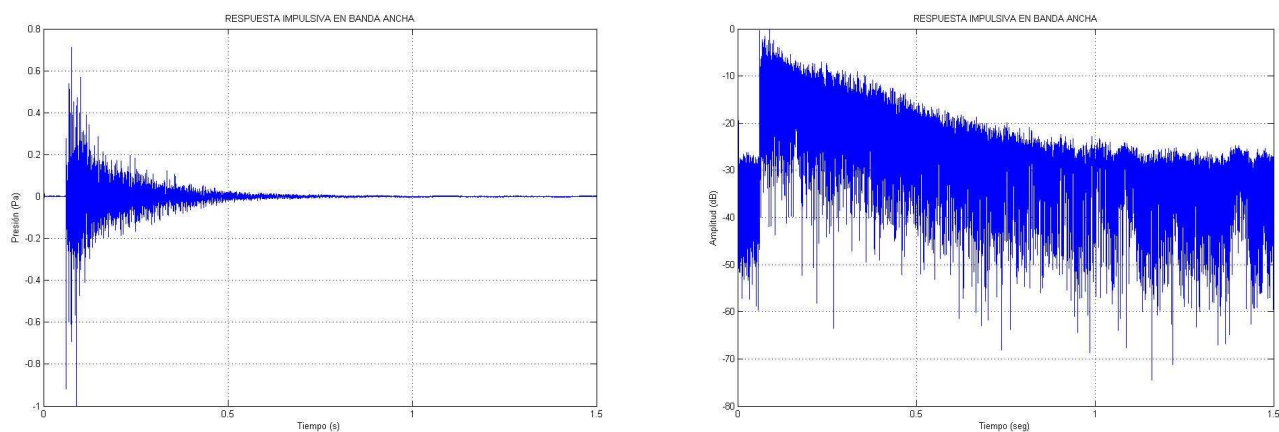


Figura 156. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

A continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

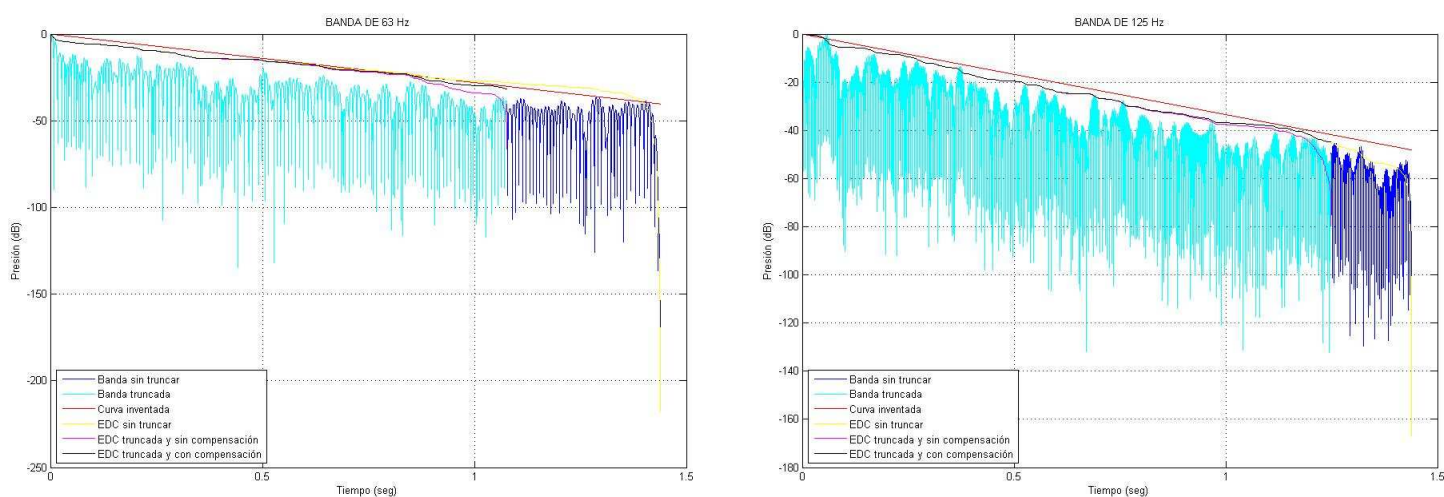


Figura 157. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

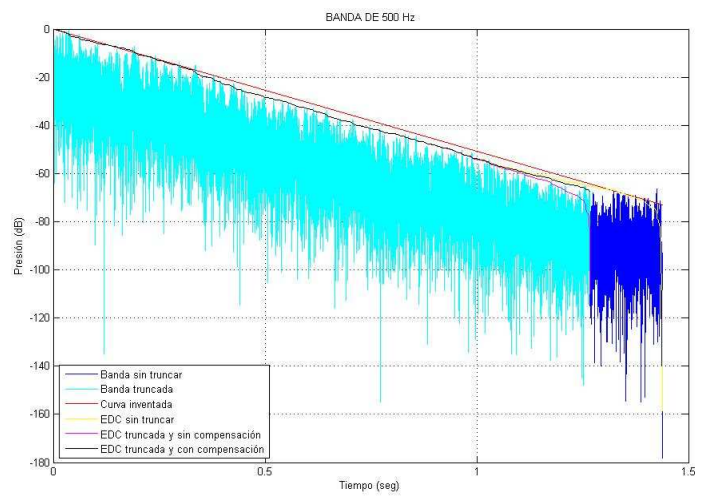
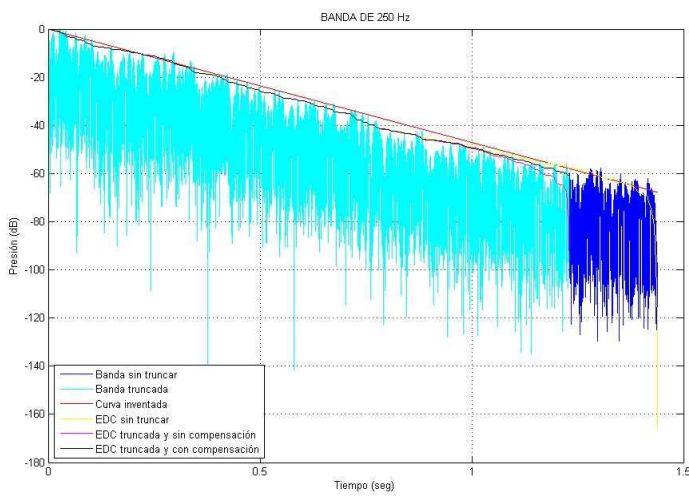


Figura 158. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

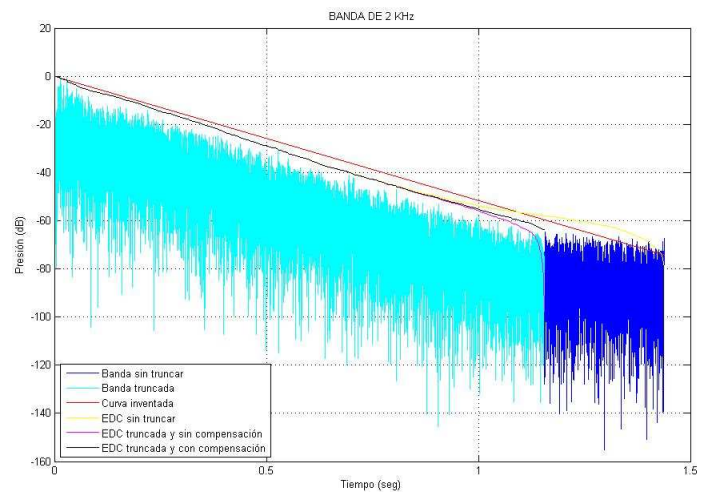
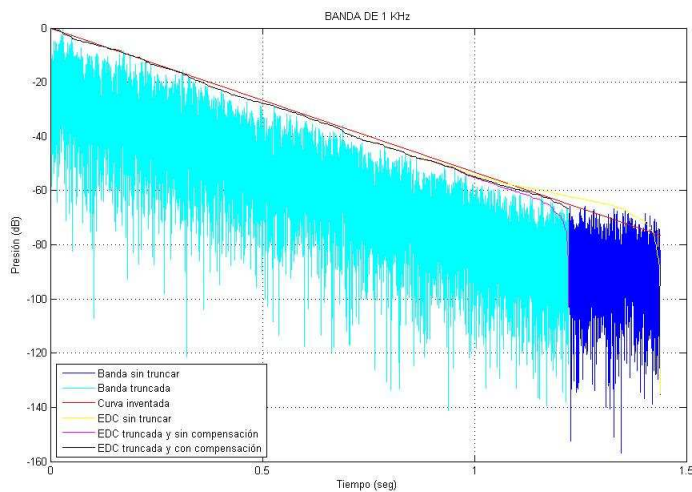


Figura 159. Curvas de decaimiento energético, bandas de 1 KHz y 2 KHz

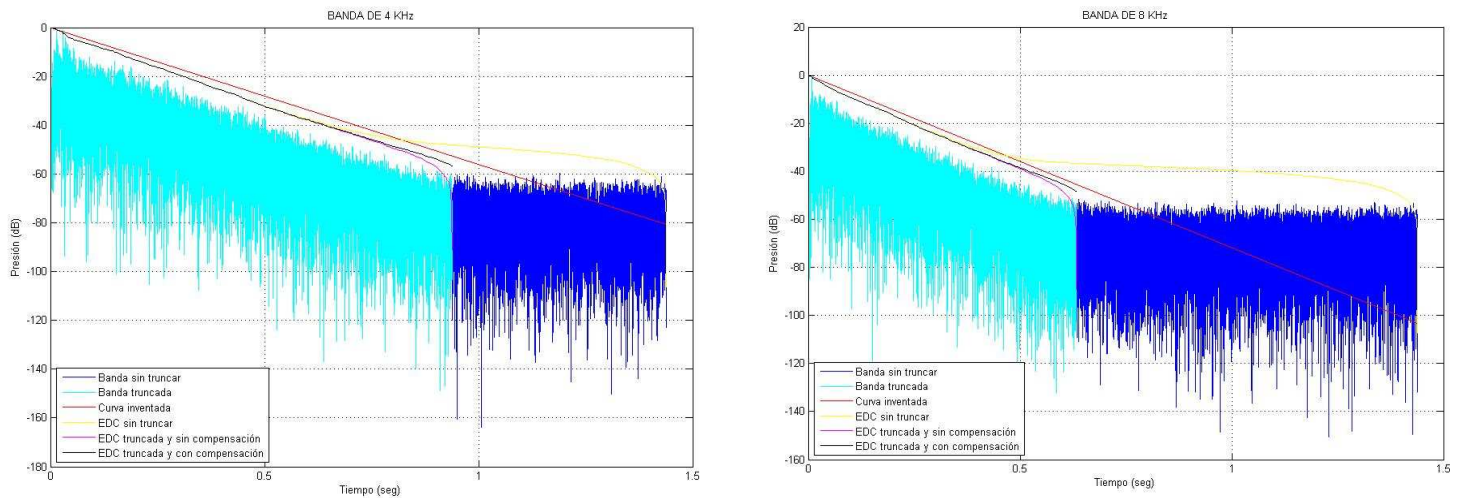


Figura 160. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada sin considerar la energía de compensación.

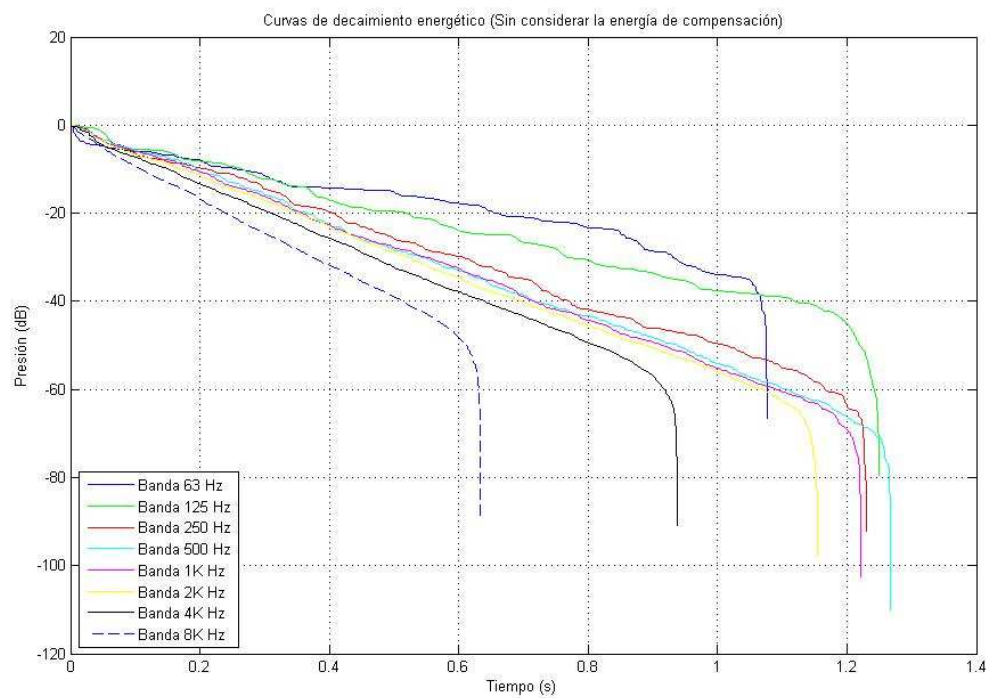


Figura 161. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

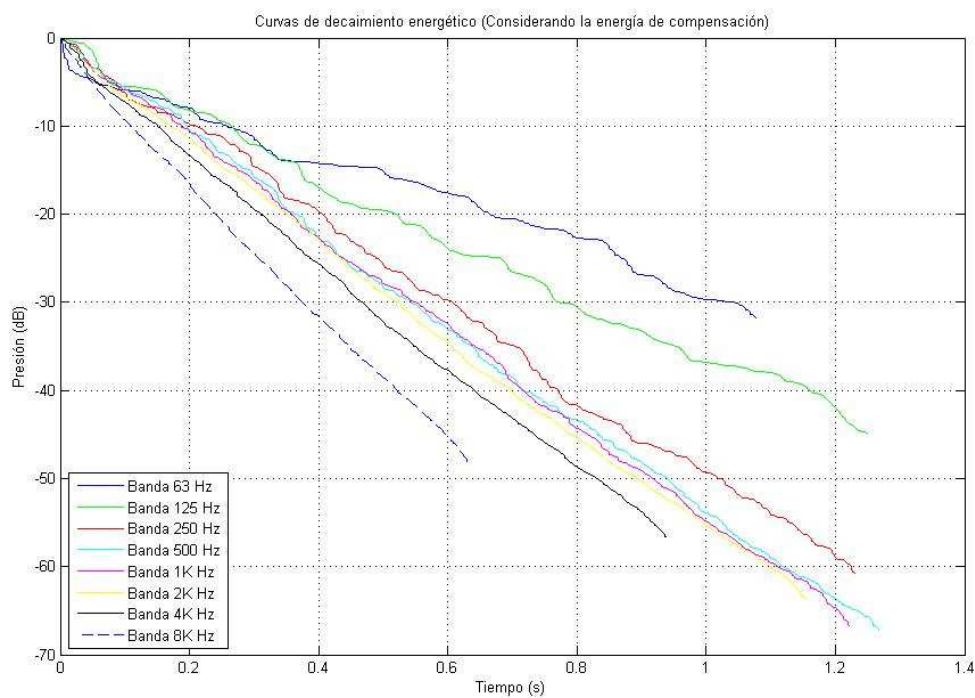


Figura 162. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

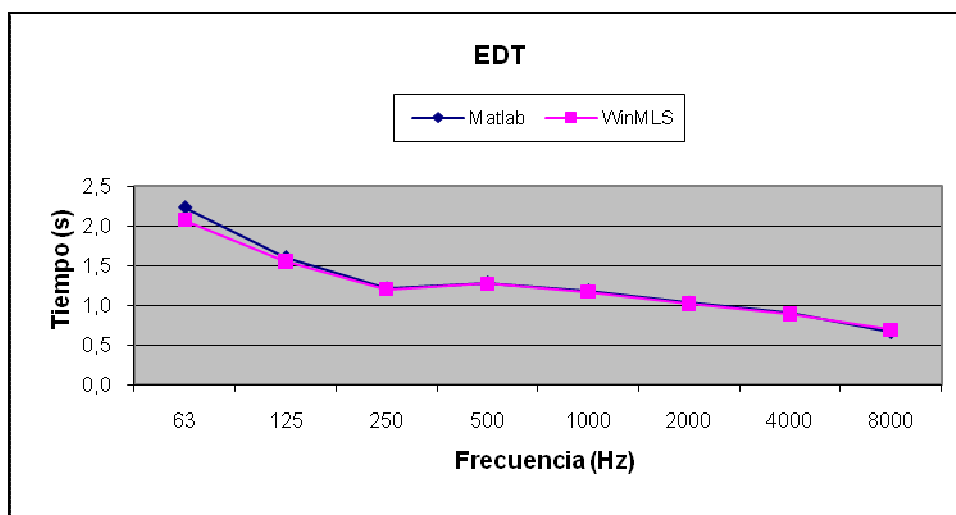


Figura 163. Comparativa EDT

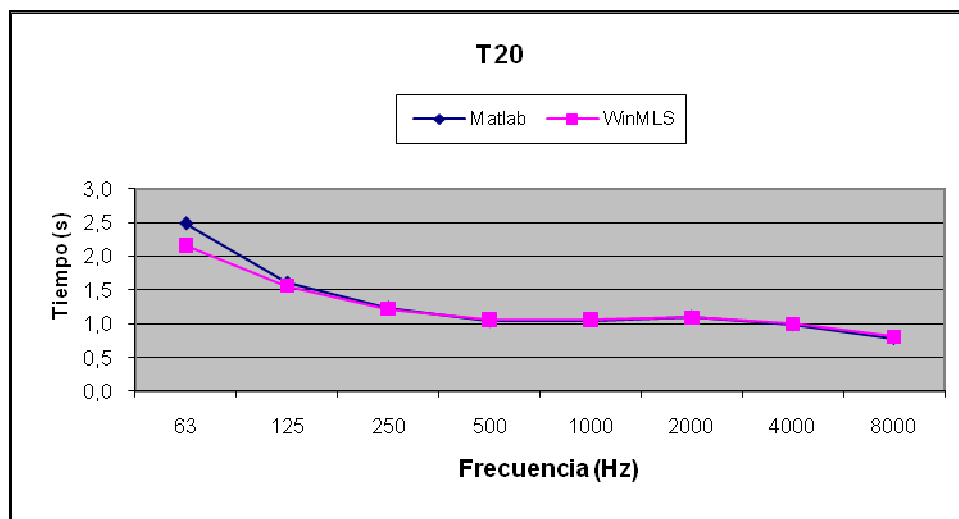


Figura 164. Comparativa T20

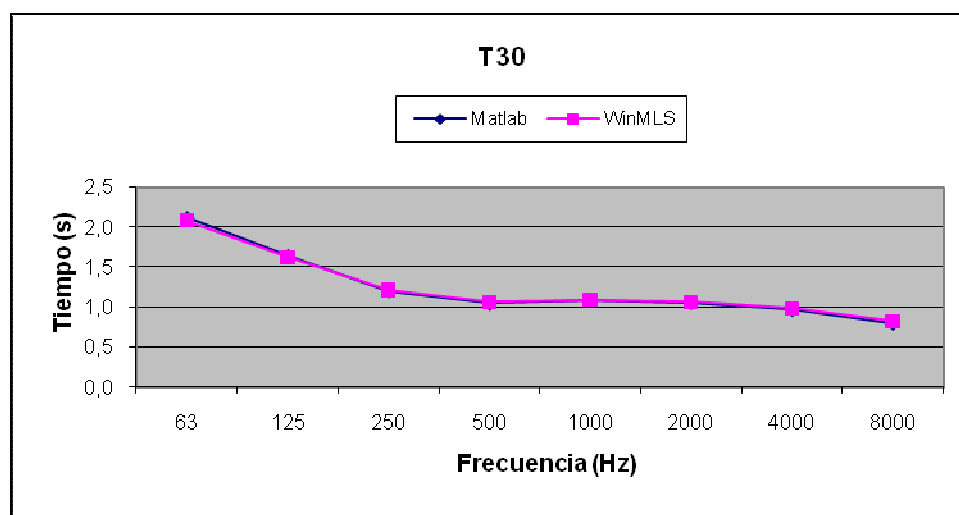


Figura 165. Comparativa T30

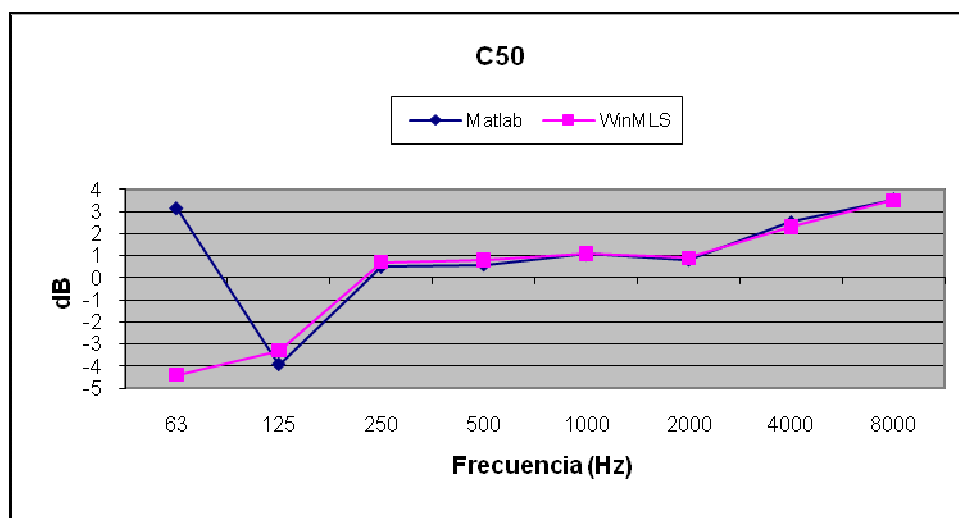


Figura 166. Comparativa C50

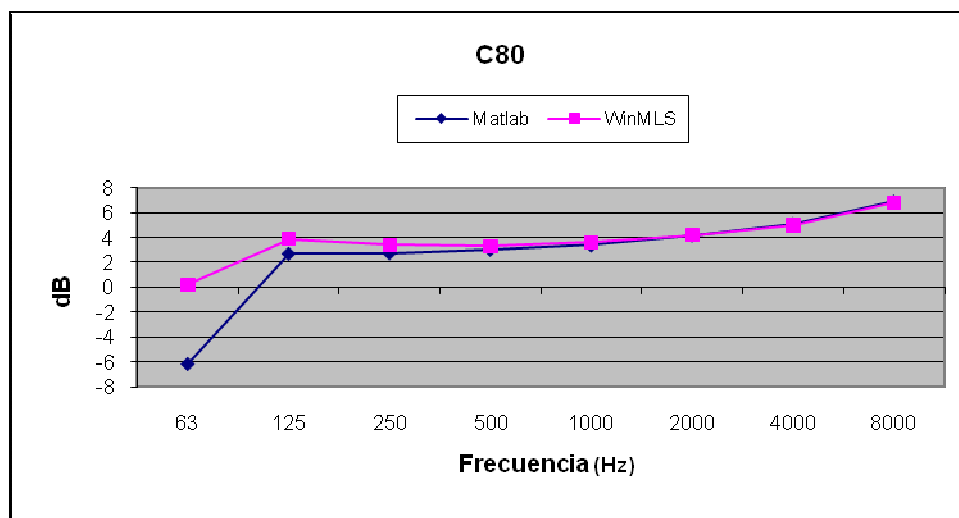


Figura 167. Comparativa C80

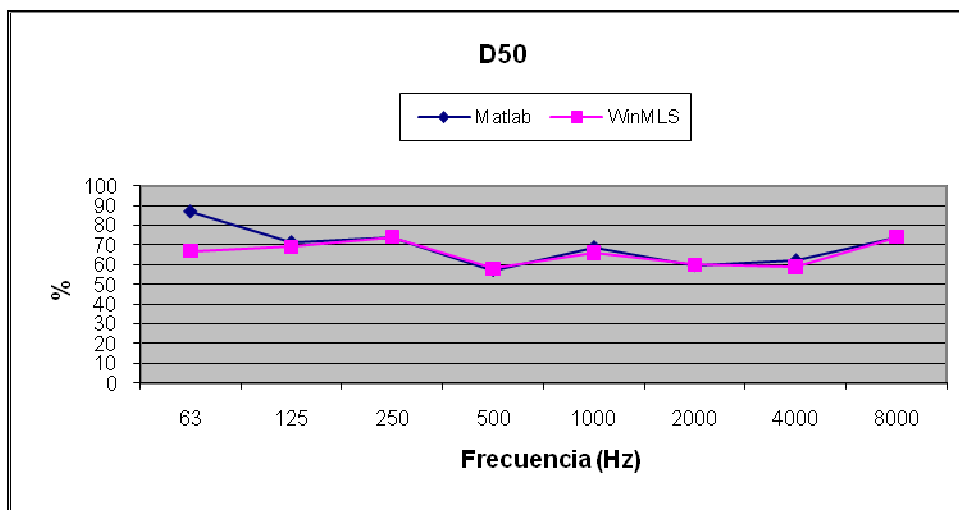


Figura 168. Comparativa D50

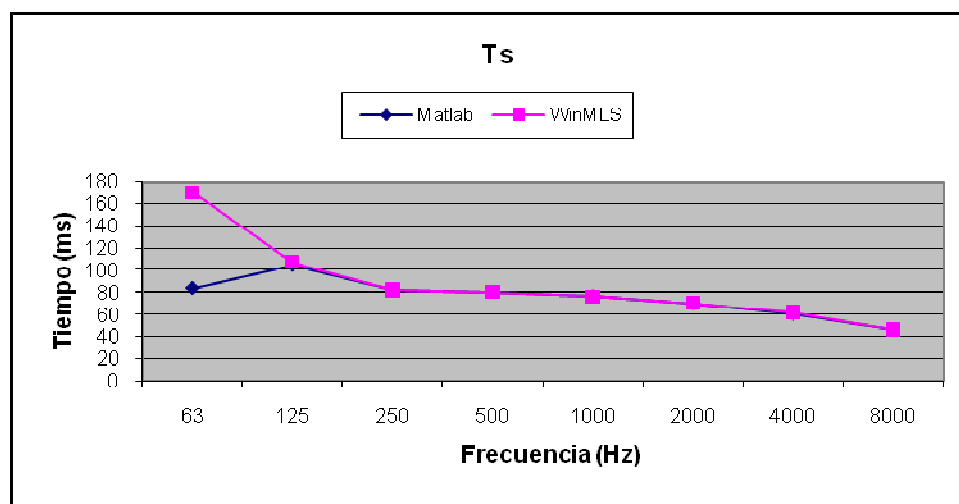


Figura 169. Comparativa Ts

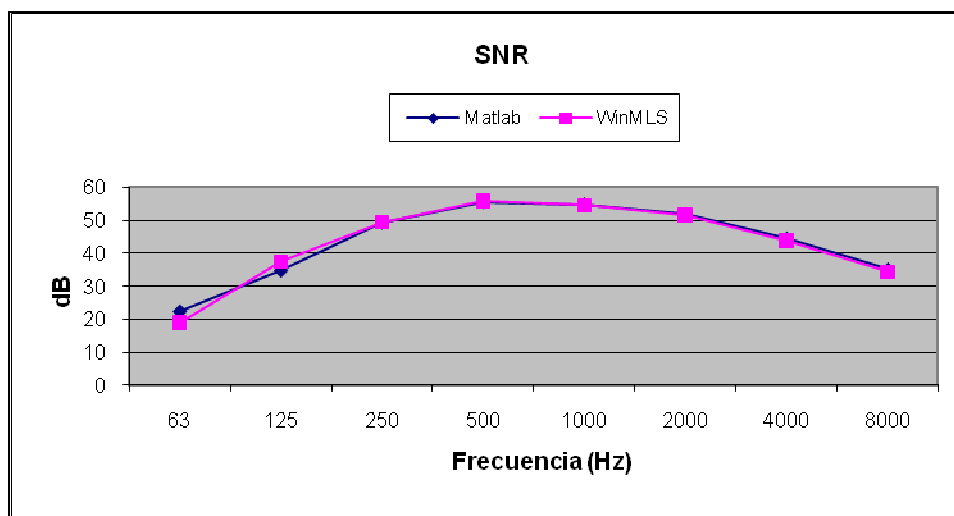


Figura 170. Comparativa SNR

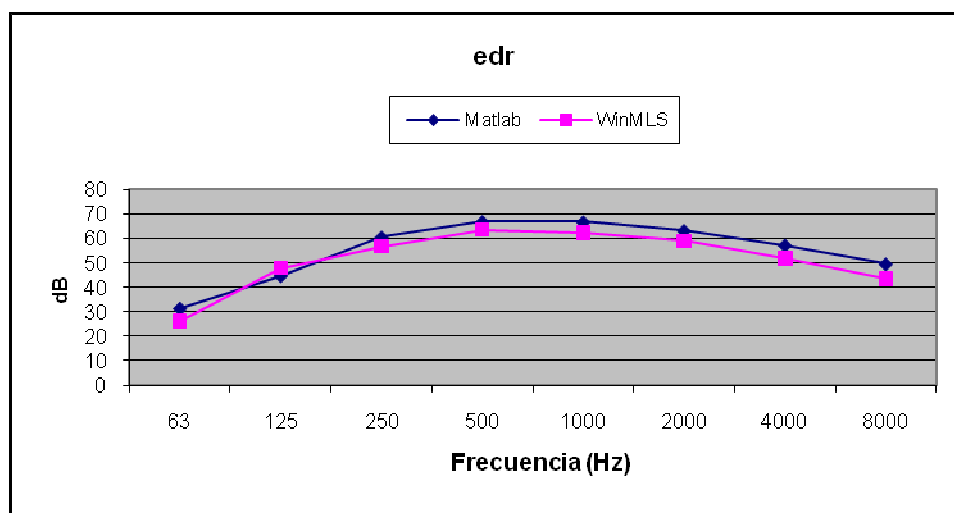


Figura 171. Comparativa edr

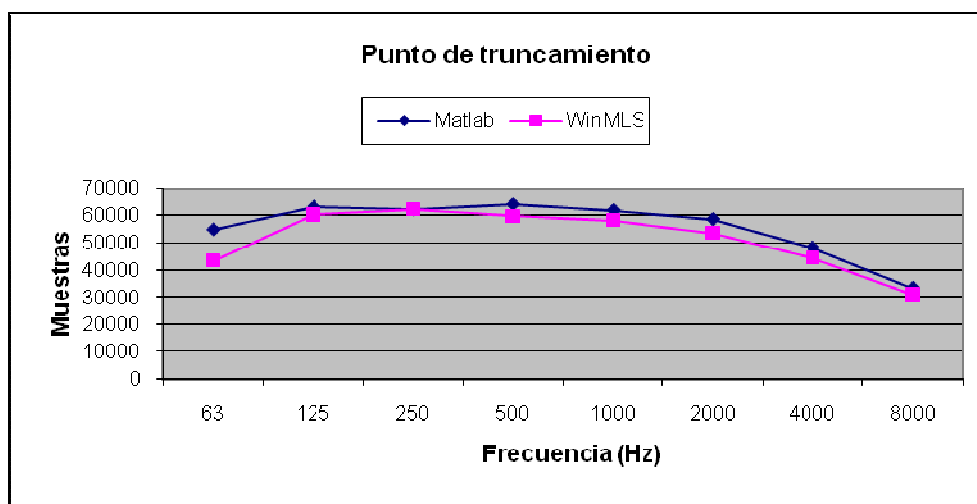


Figura 172. Comparativa punto de truncamiento

Teatro Bretón

Se realiza el estudio de dos señales diferentes captadas en el *Teatro Bretón* con un TR_{mid} de 1,4 segundos.

Señal “R7-F1-Gras.wmb”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

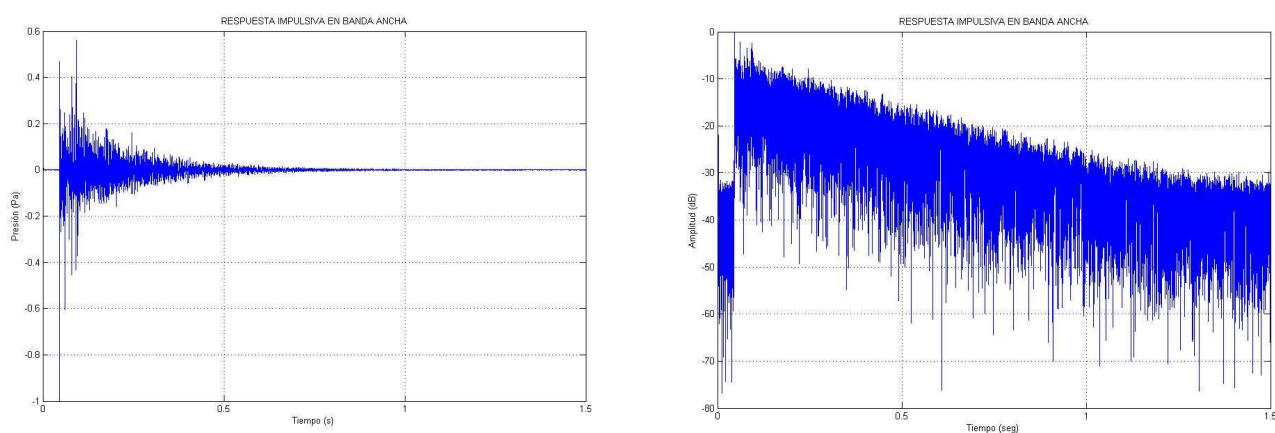


Figura 173. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

A continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

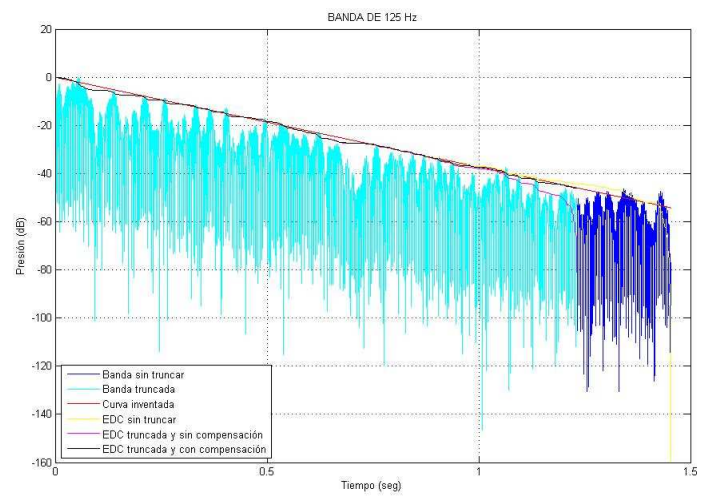
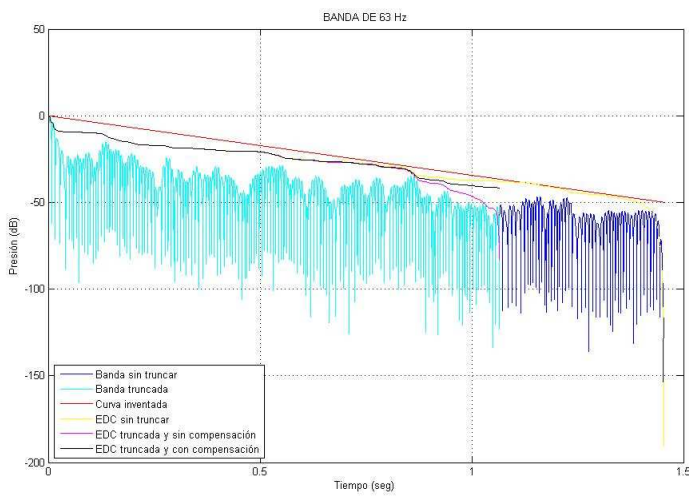


Figura 174. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

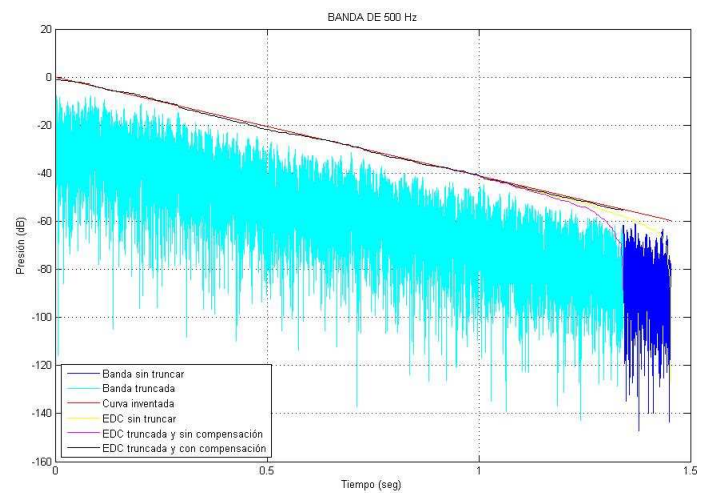
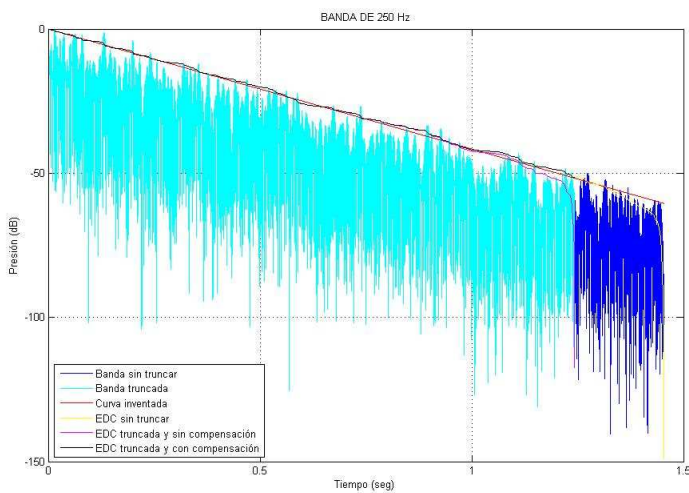


Figura 175. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

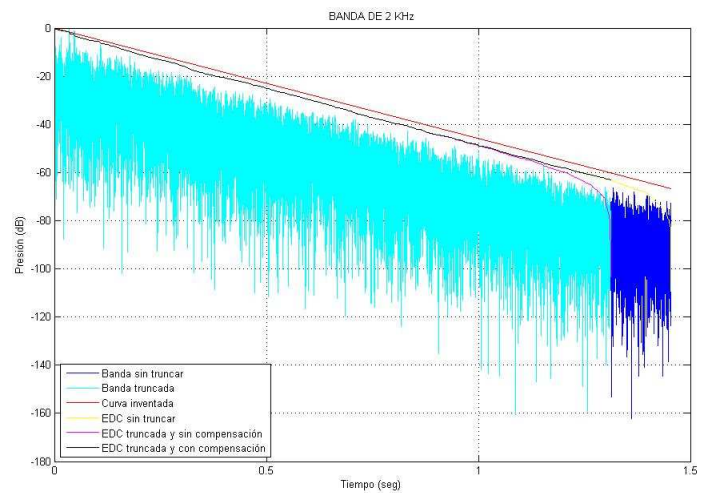
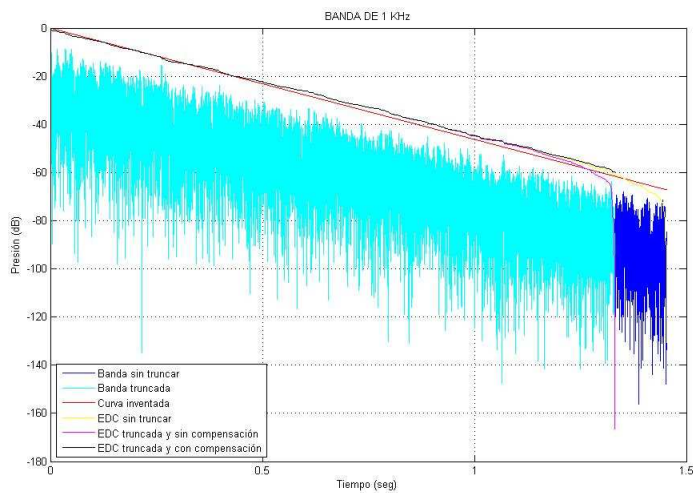


Figura 176. Curvas de decaimiento energético, bandas de 1 KHz y 2 KHz

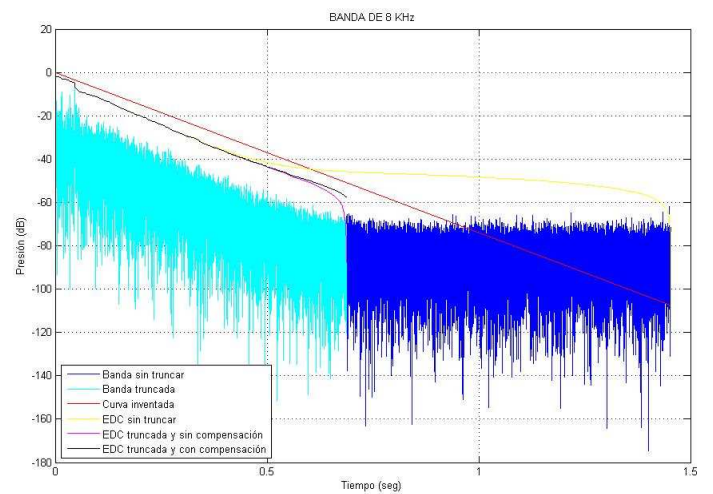
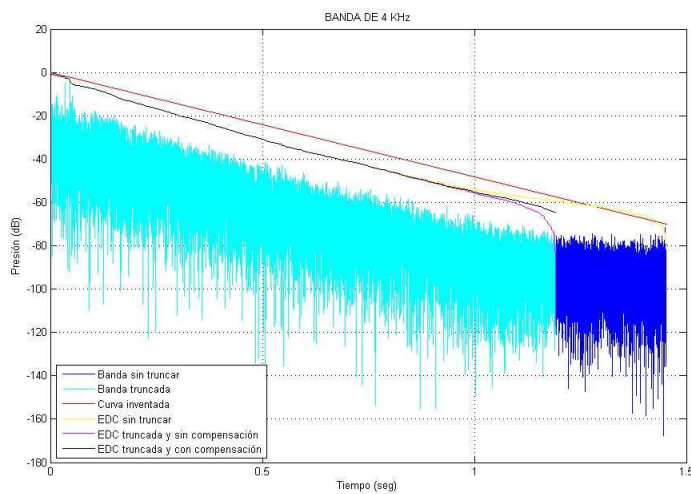


Figura 177. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava troncada sin considerar la energía de compensación.

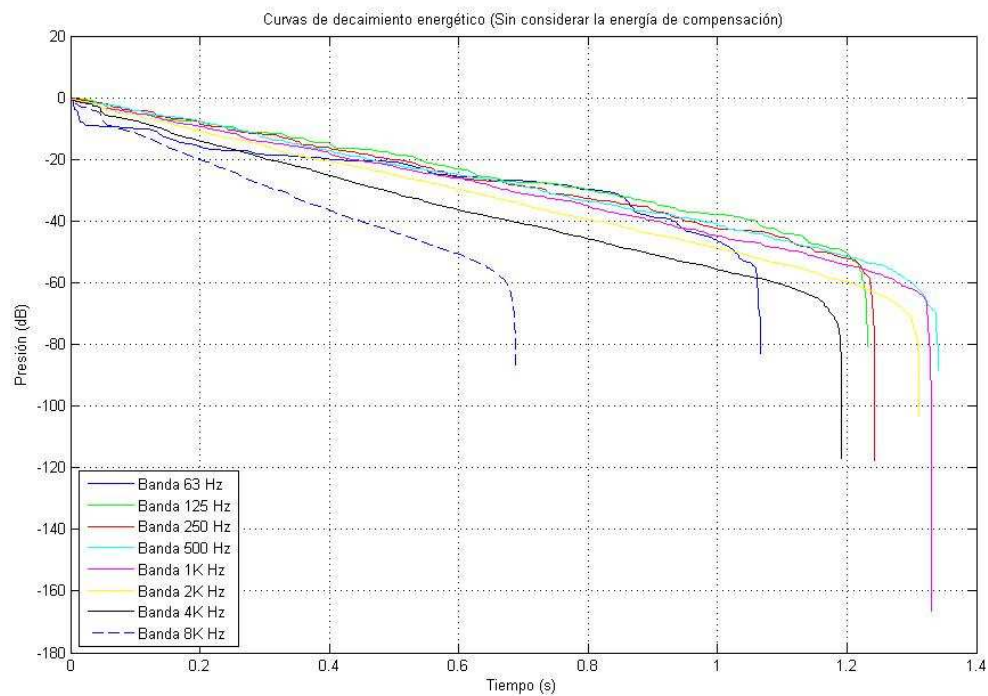


Figura 178. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

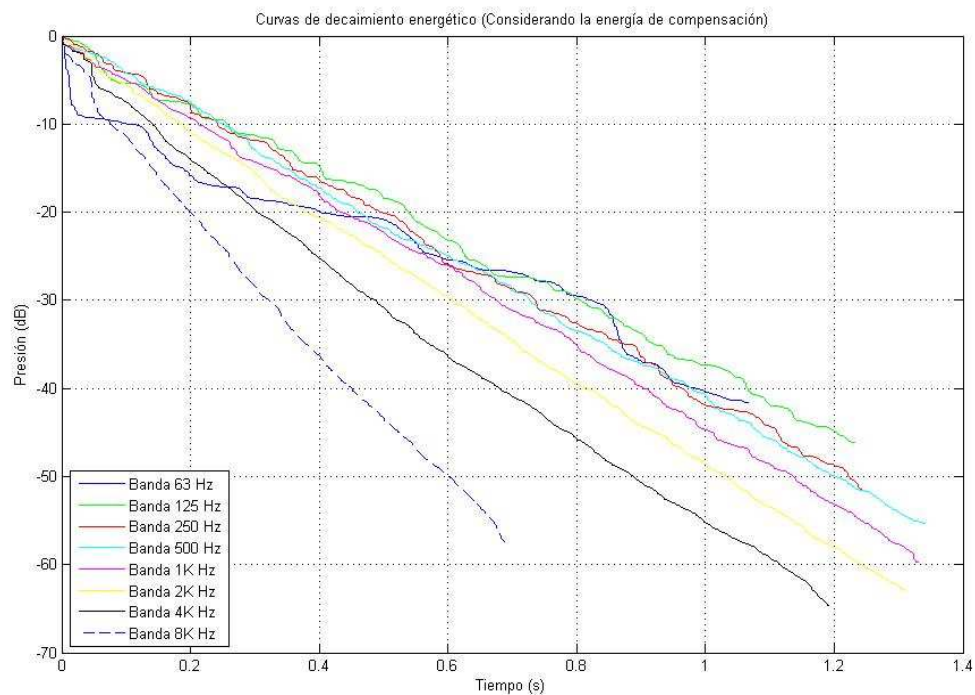


Figura 179. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

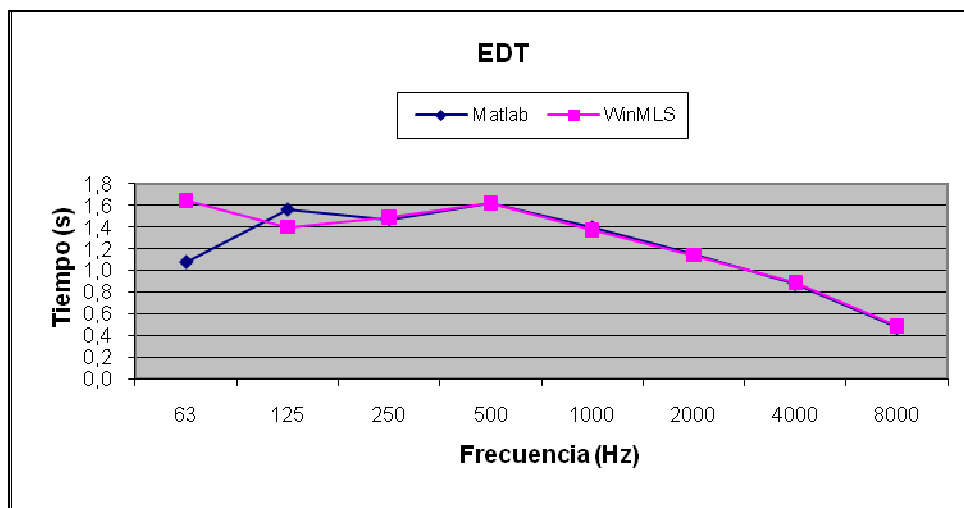


Figura 180. Comparativa EDT

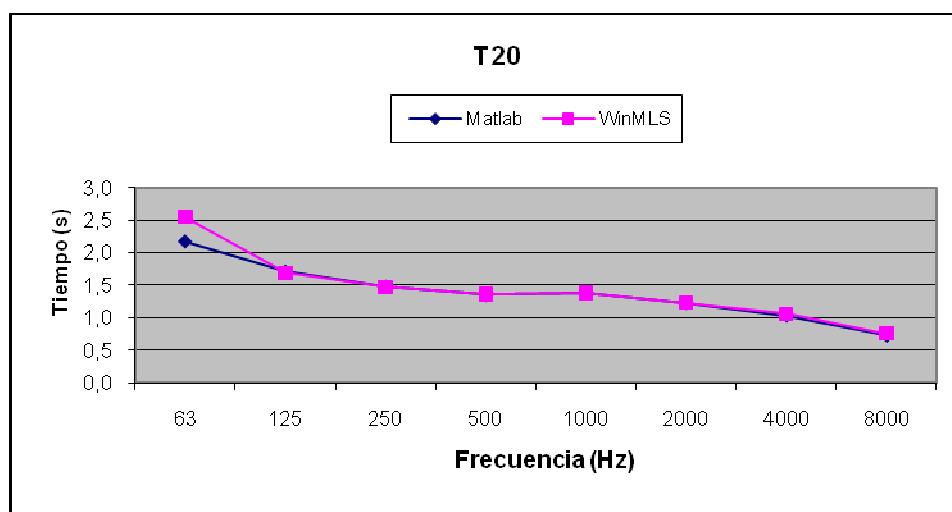


Figura 181. Comparativa T20

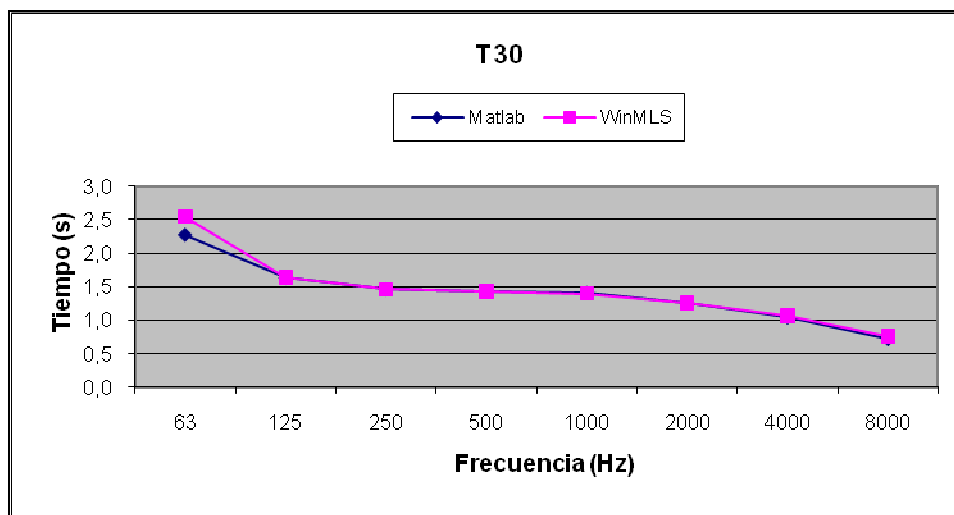


Figura 182. Comparativa T30

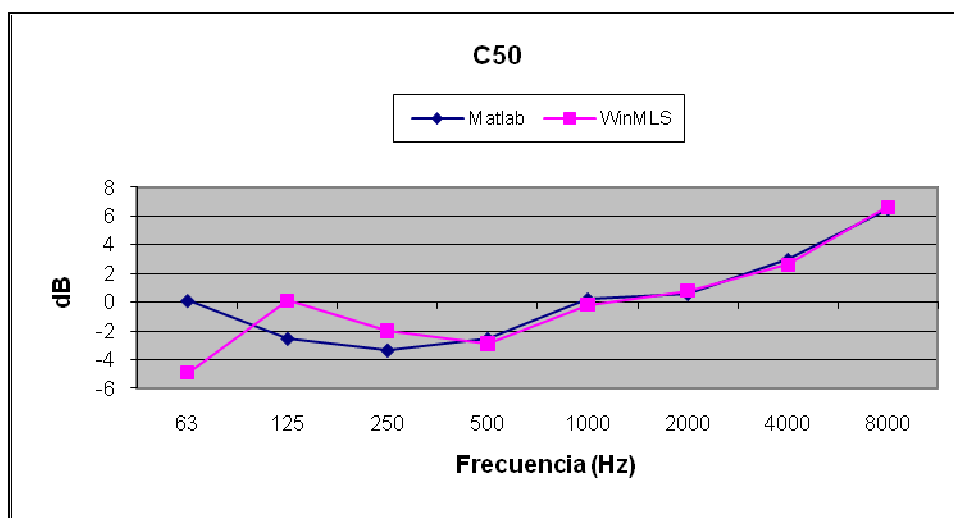


Figura 183. Comparativa C50

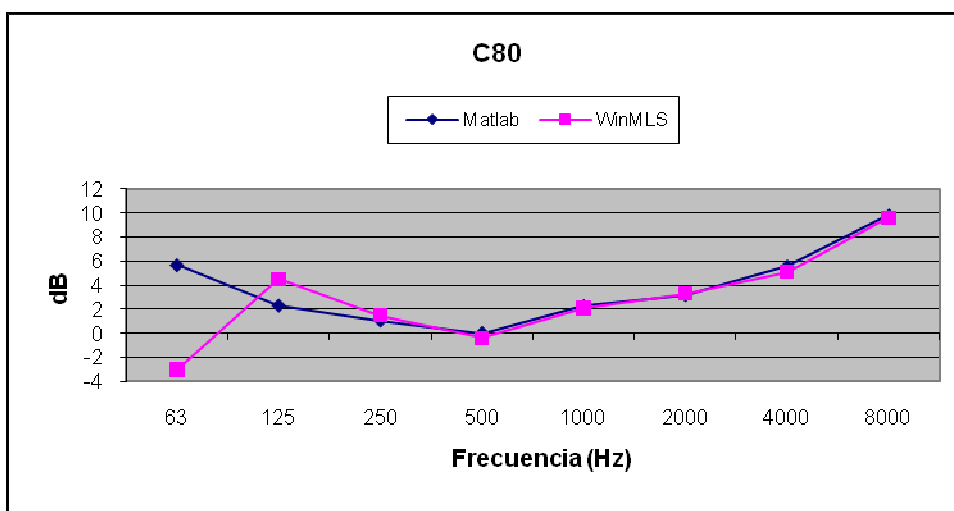


Figura 184. Comparativa C80

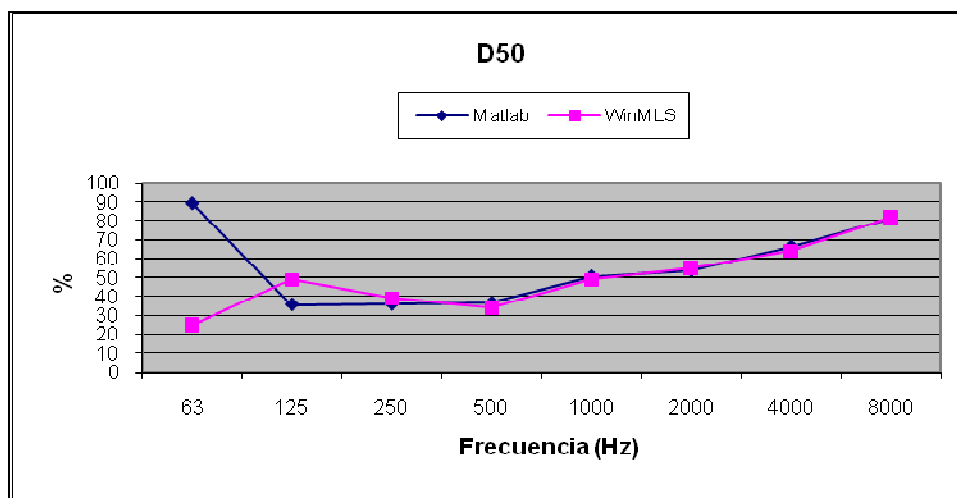


Figura 185. Comparativa D50

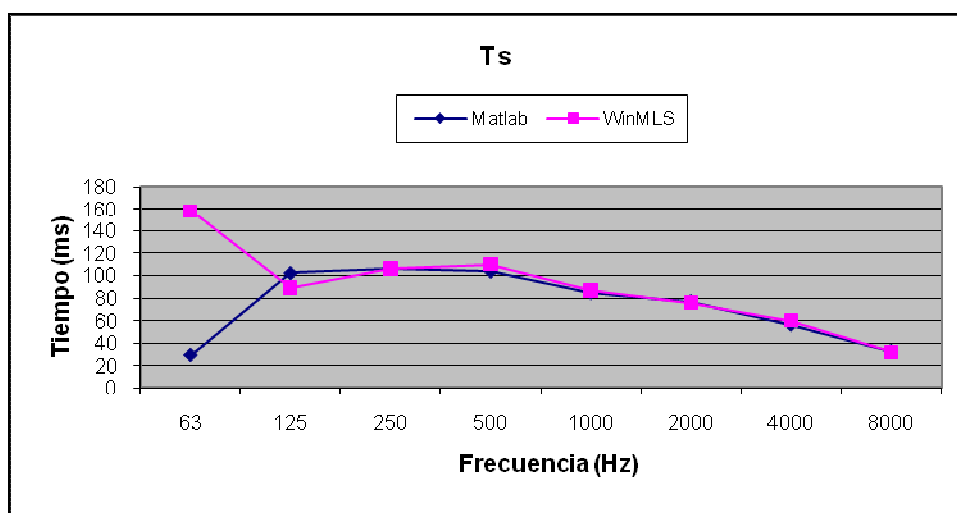


Figura 186. Comparativa Ts

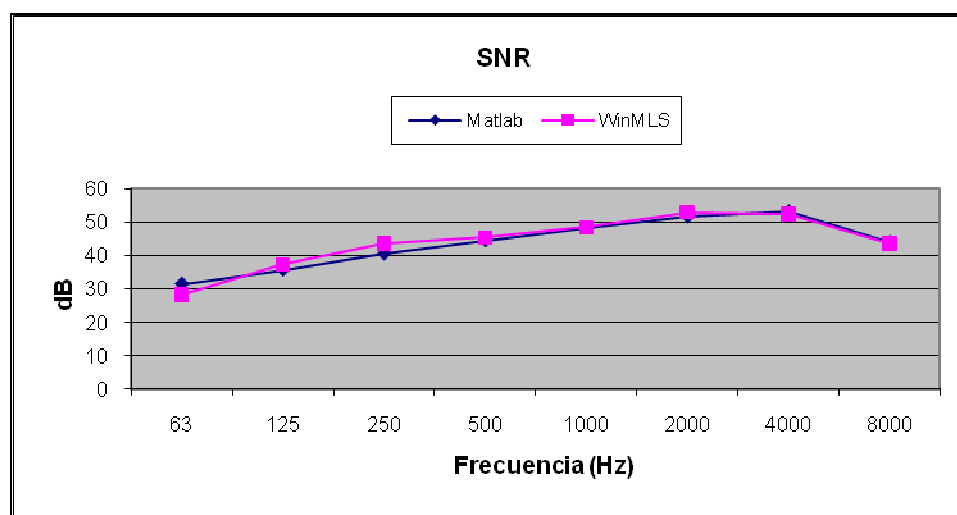


Figura 187. Comparativa SNR

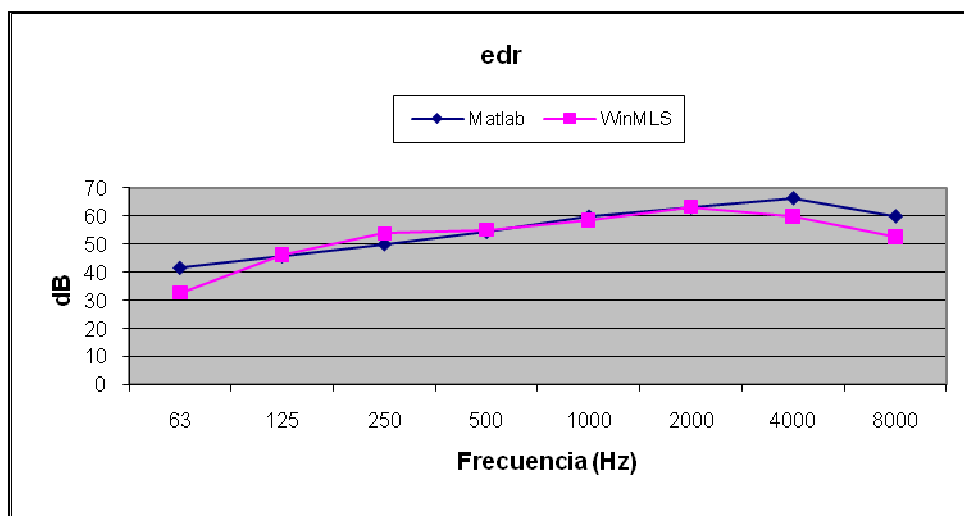


Figura 188. Comparativa edr

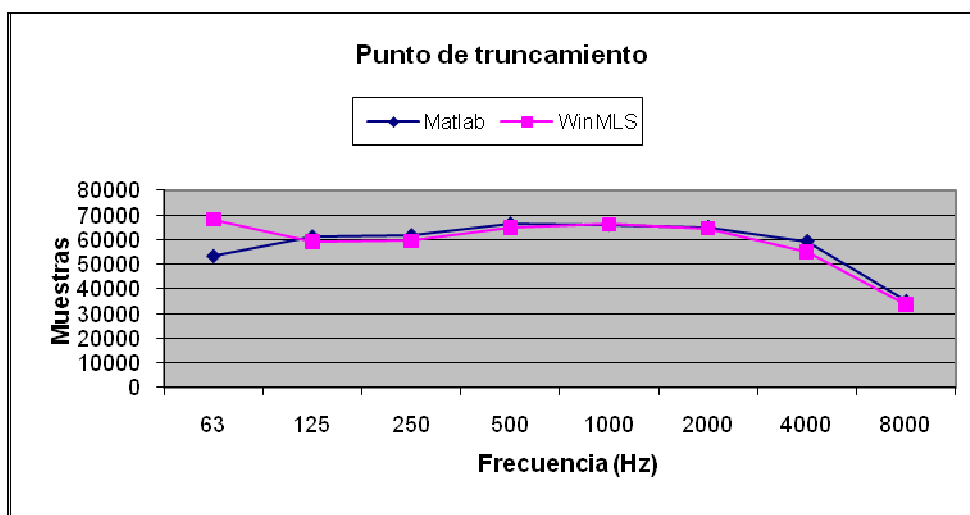


Figura 189. Comparativa punto de truncamiento

Señal “R9-F1-Gras”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

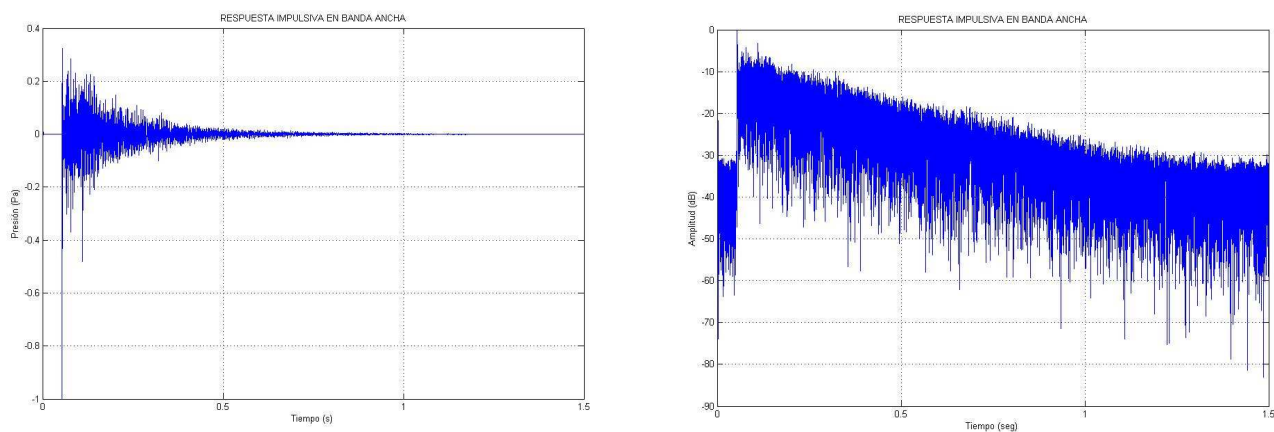


Figura 190. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

A continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

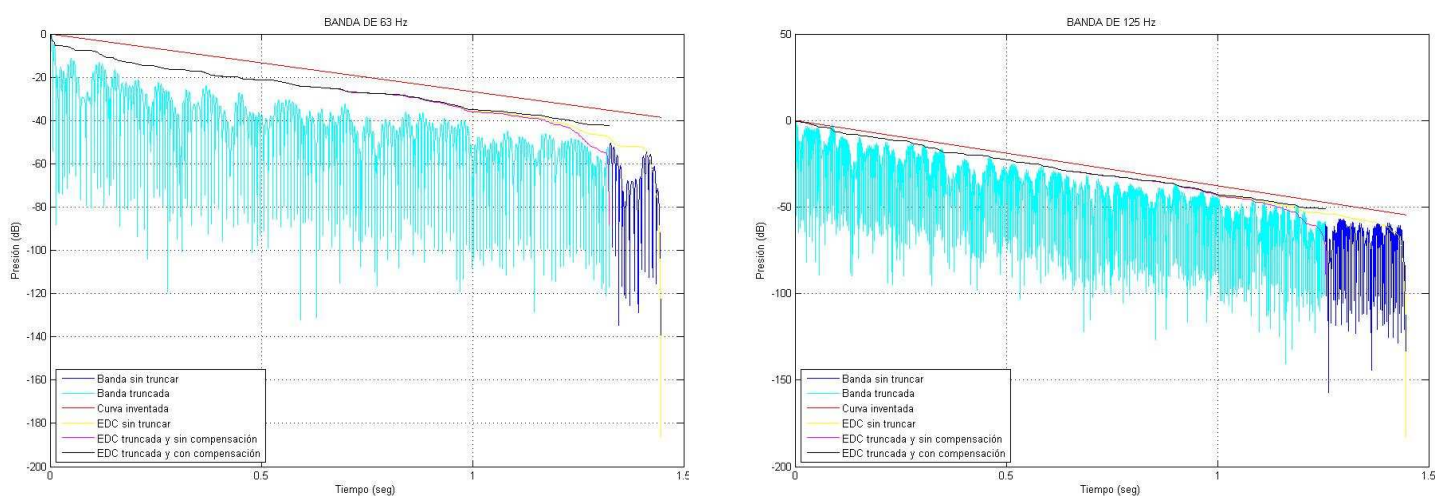


Figura 191. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

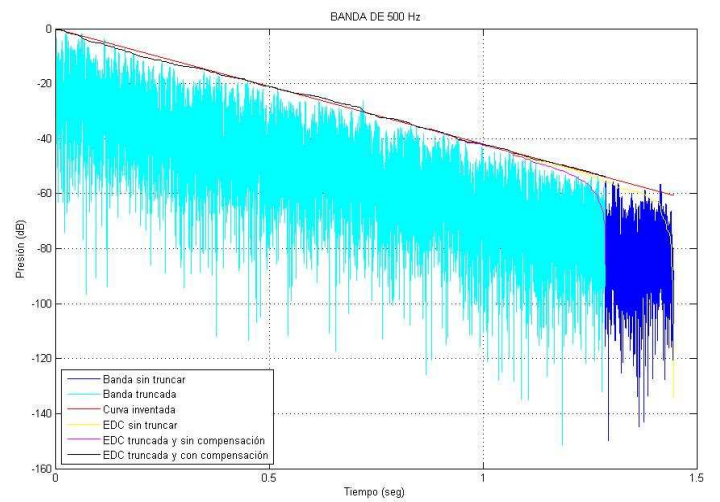
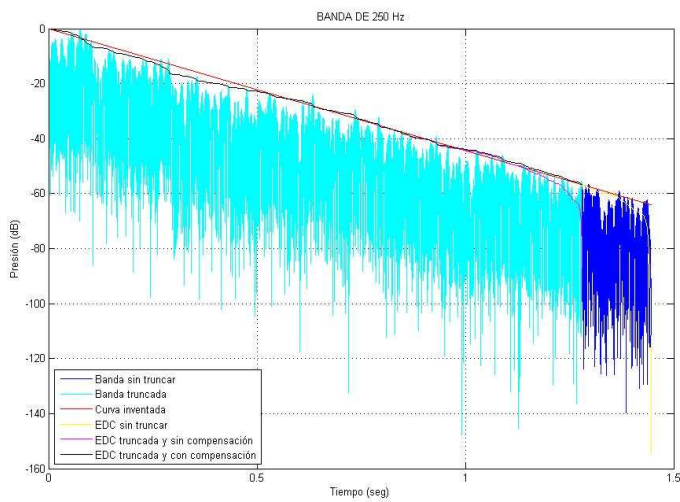


Figura 192. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

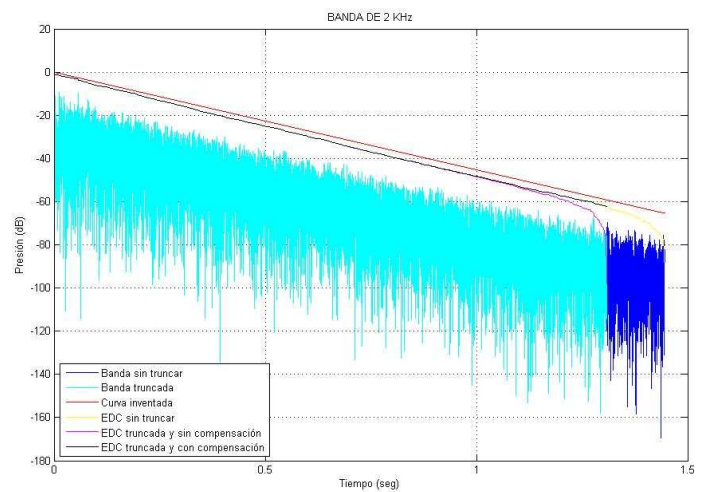
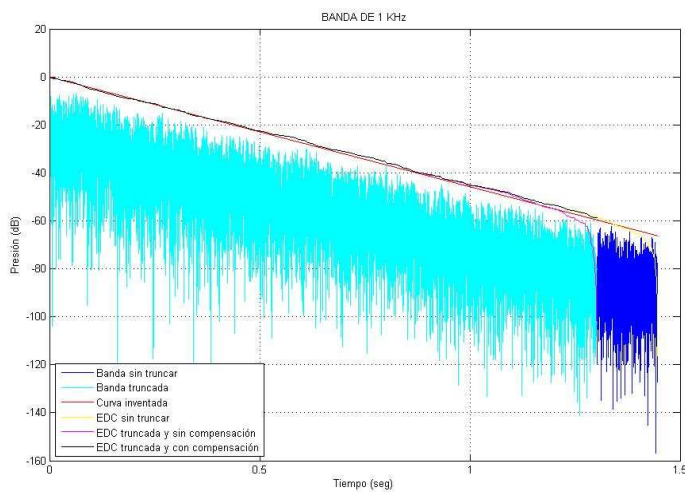


Figura 193. Curvas de decaimiento energético, bandas de 1 KHz y 2 KHz

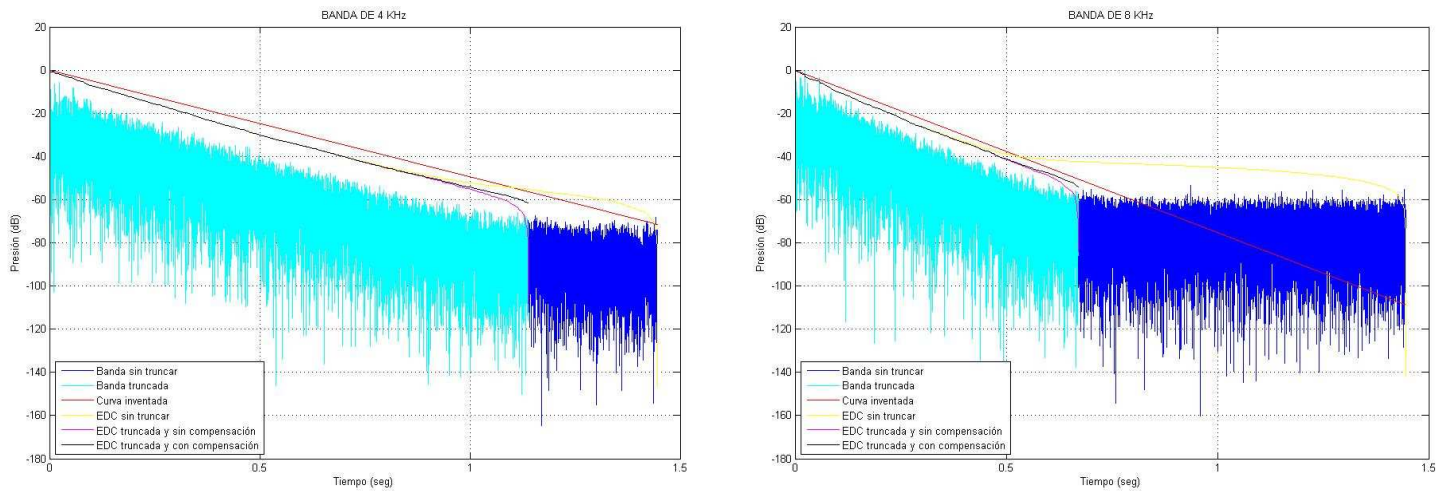


Figura 194. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada sin considerar la energía de compensación.

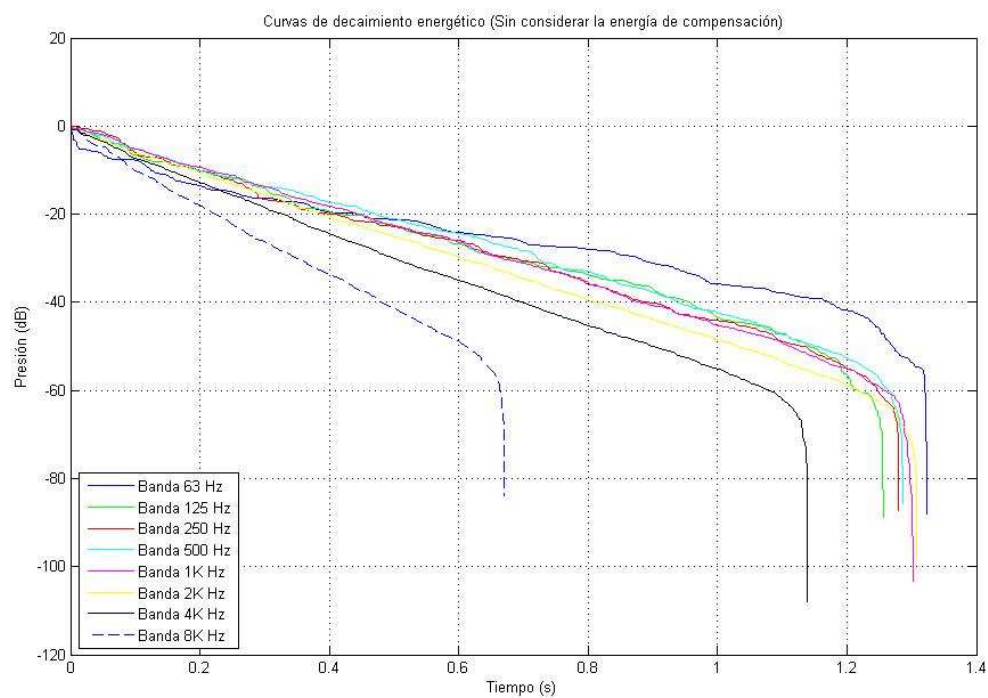


Figura 195. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

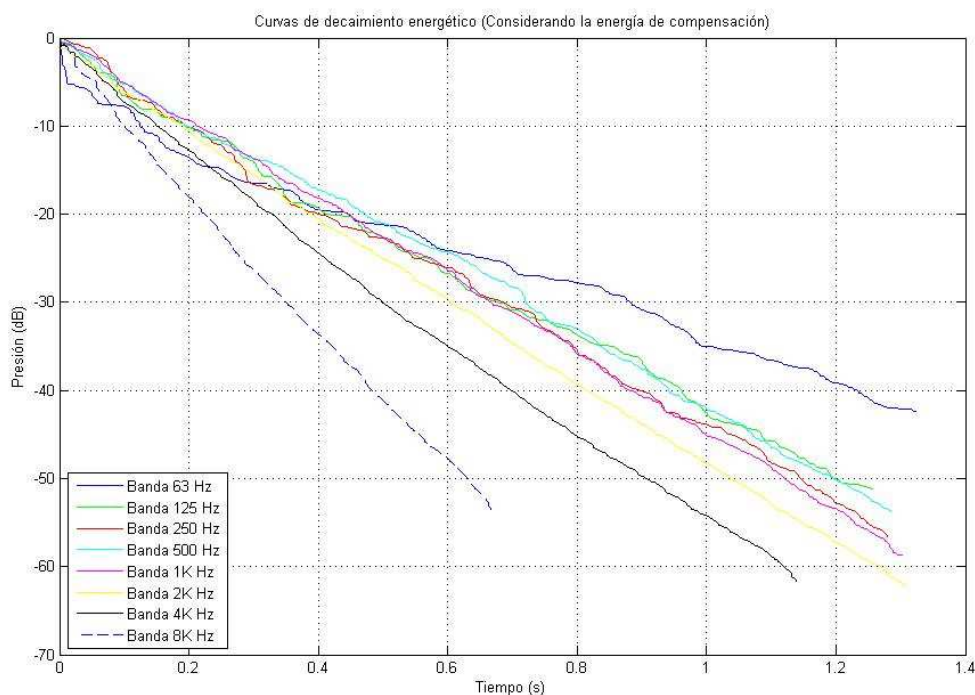


Figura 196. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

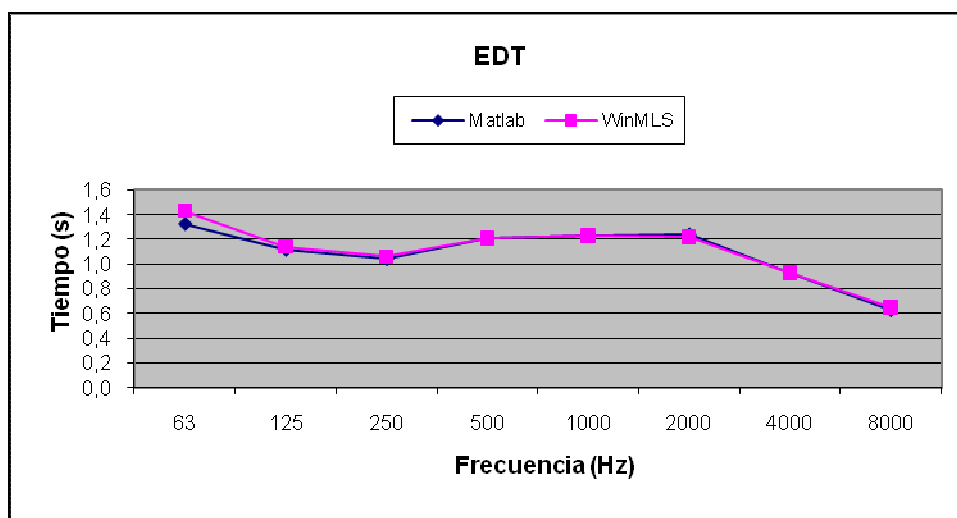


Figura 197. Comparativa EDT

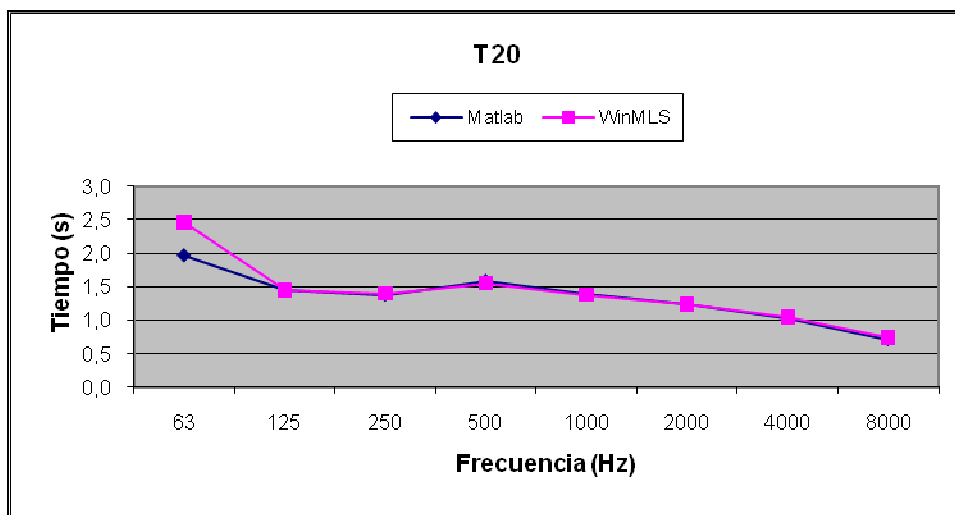


Figura 198. Comparativa T20

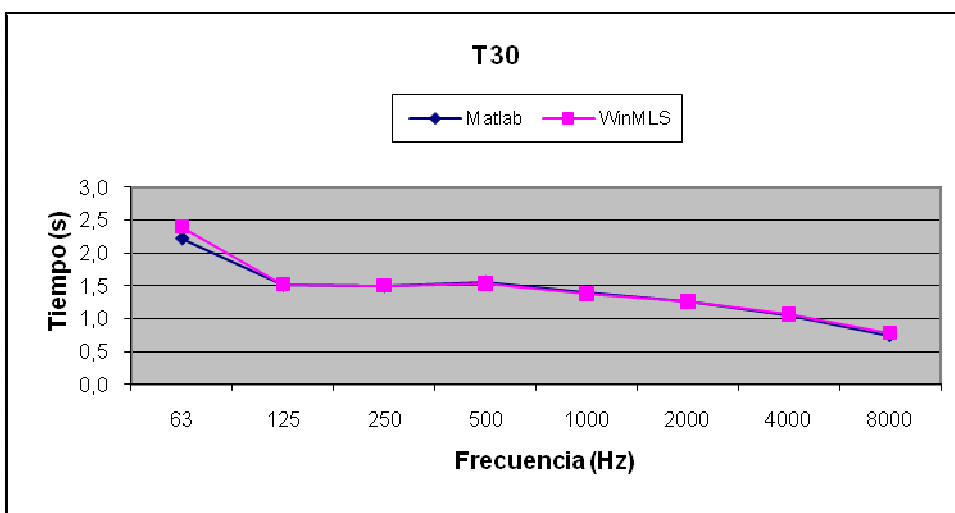


Figura 199. Comparativa T30

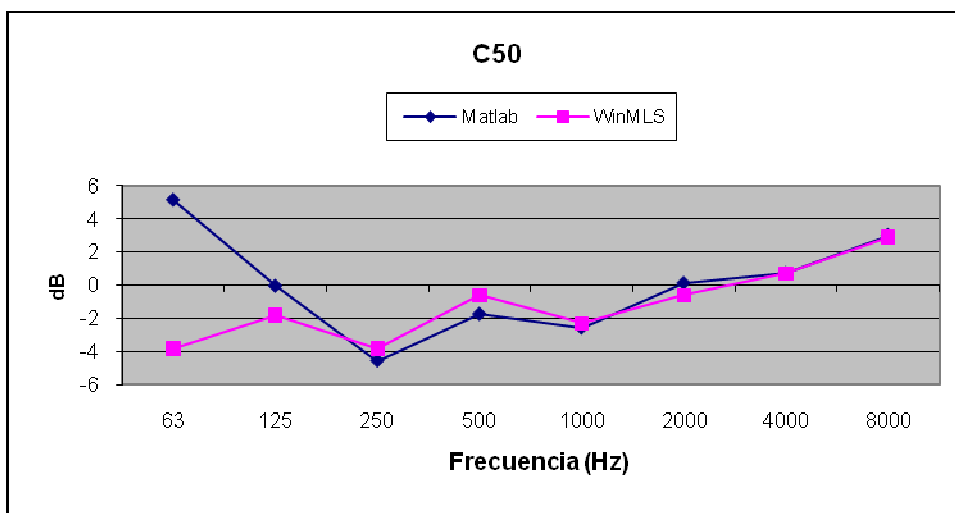


Figura 200. Comparativa C50

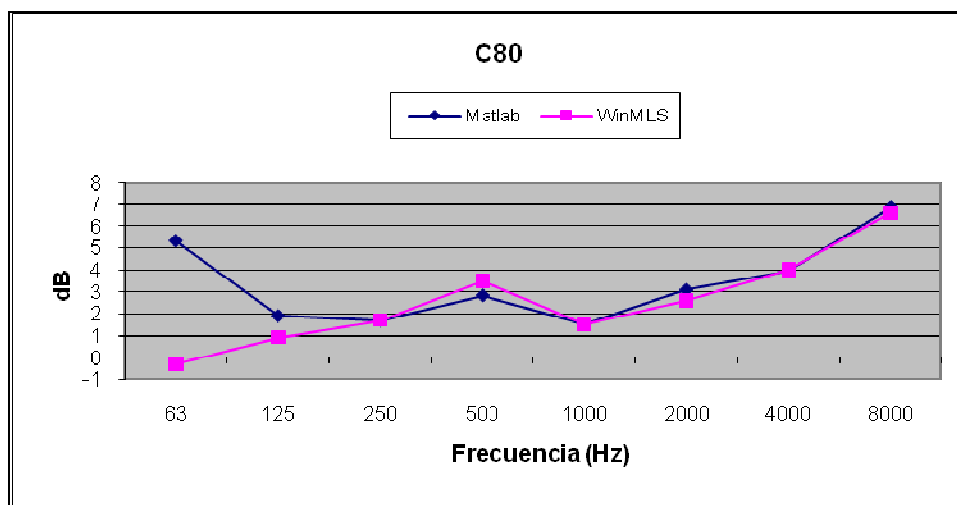


Figura 201. Comparativa C80

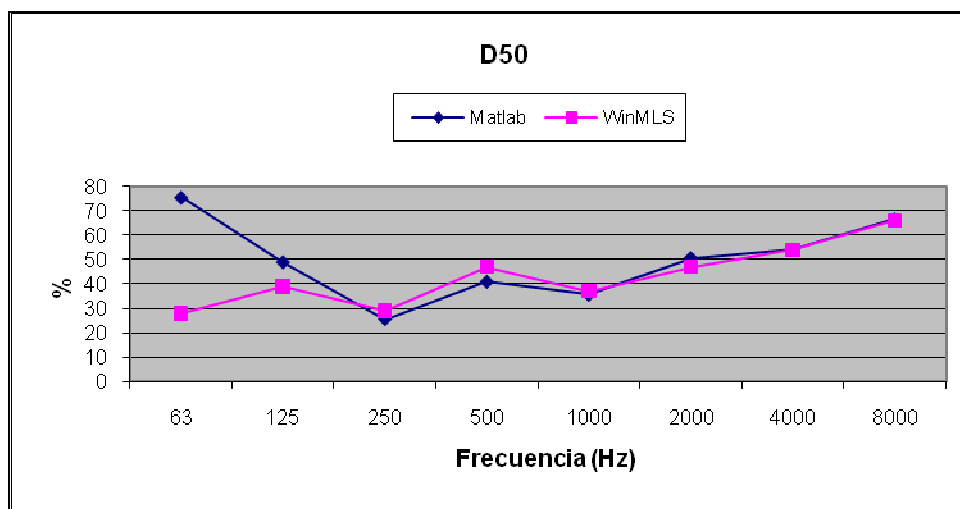


Figura 202. Comparativa D50

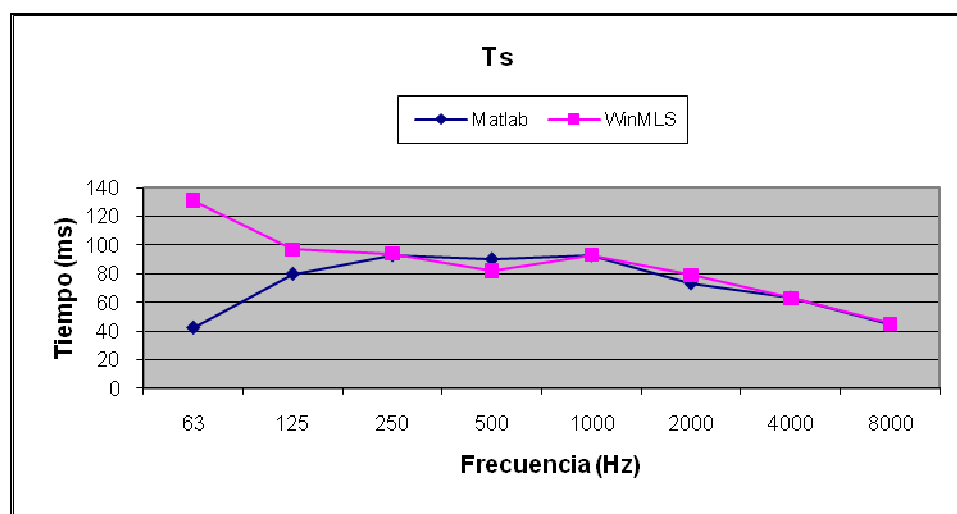


Figura 203. Comparativa Ts

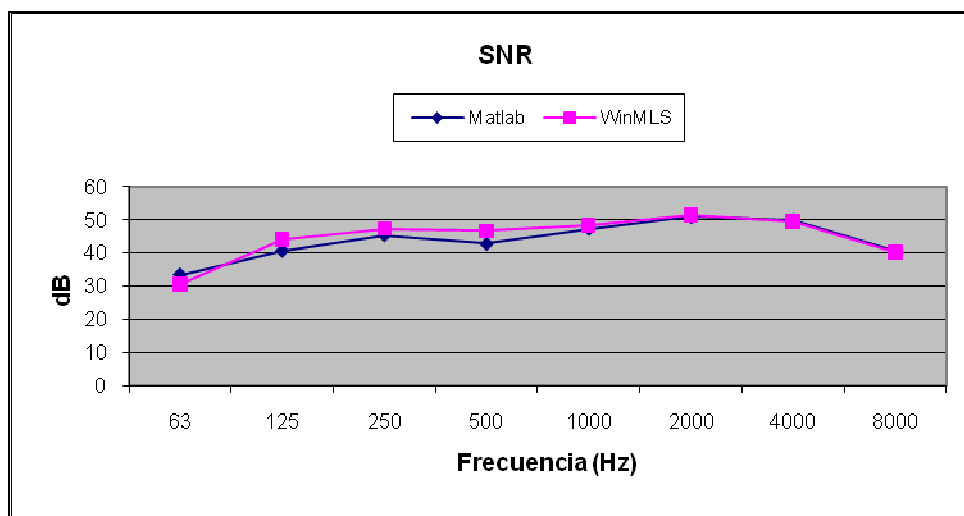


Figura 204. Comparativa SNR

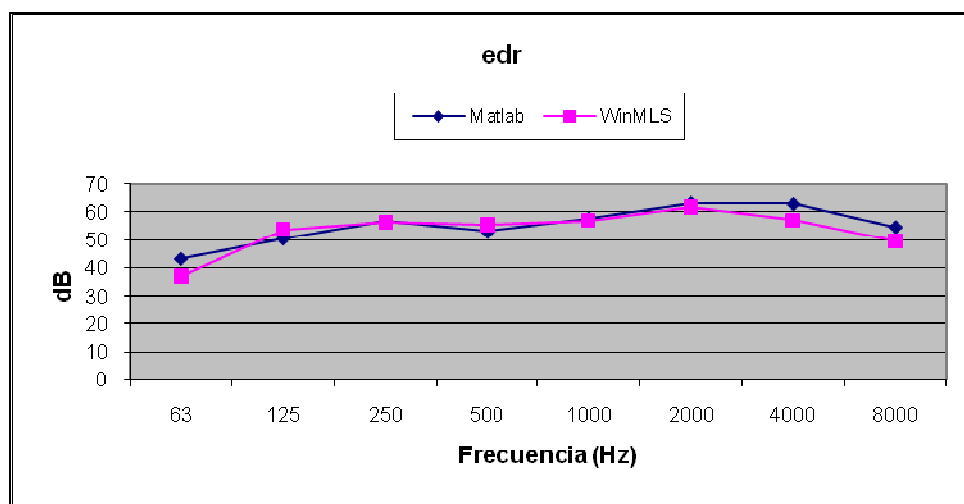


Figura 205. Comparativa edr

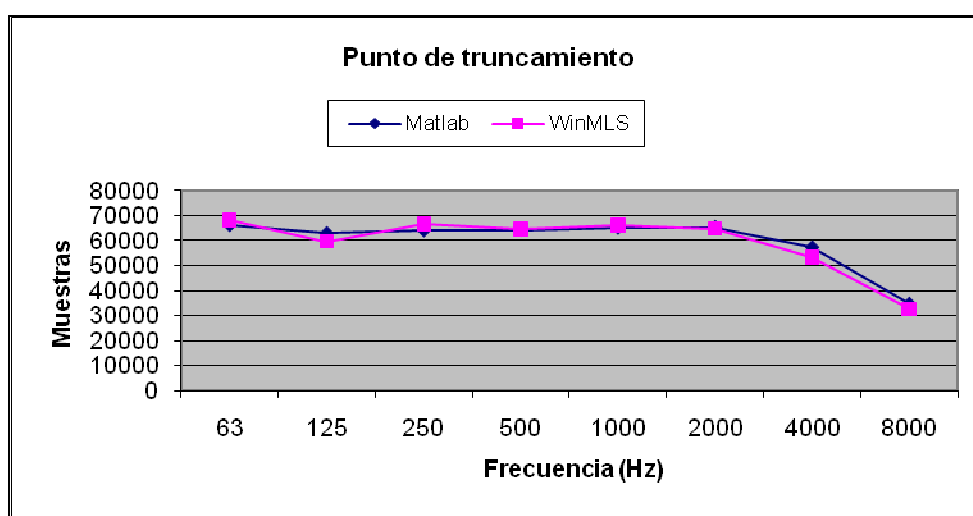


Figura 206. Comparativa punto de truncamiento

Auditorio Kursaal

Se realiza el estudio de dos señales diferentes captadas en el *Auditorio Kursaal* con un TR_{mid} de 1,9 segundos.

Señal “Ch1_41_S1_1_GT1”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

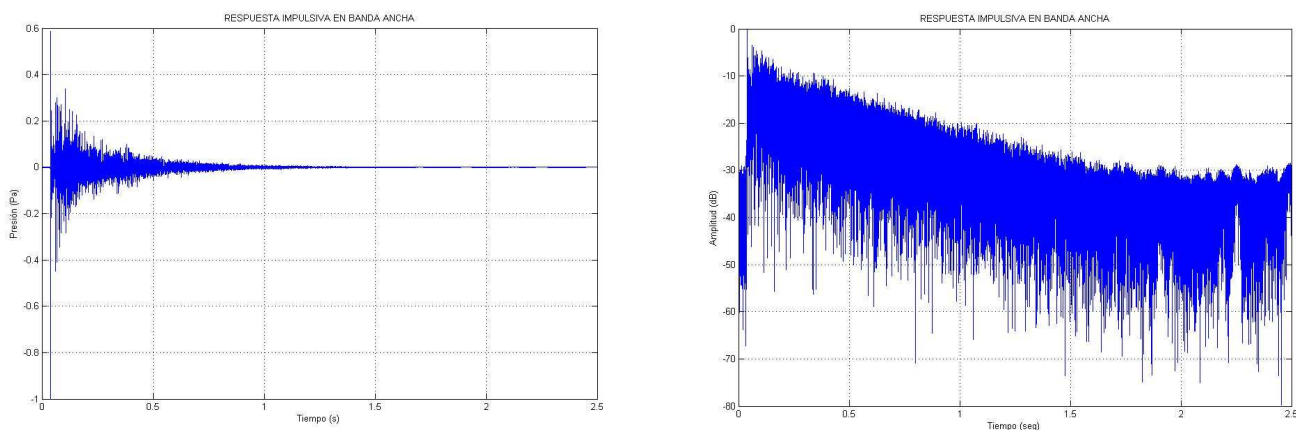


Figura 207. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

A continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

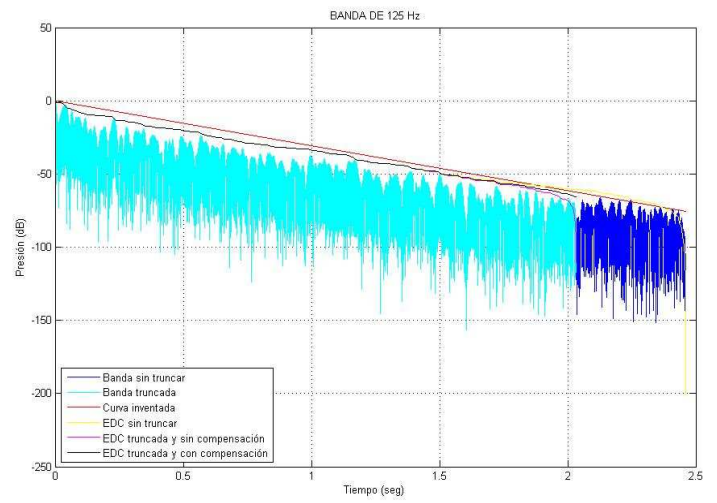
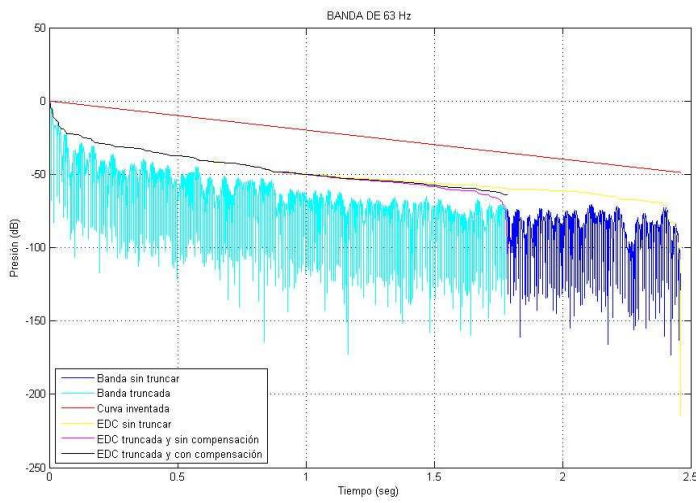


Figura 208. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

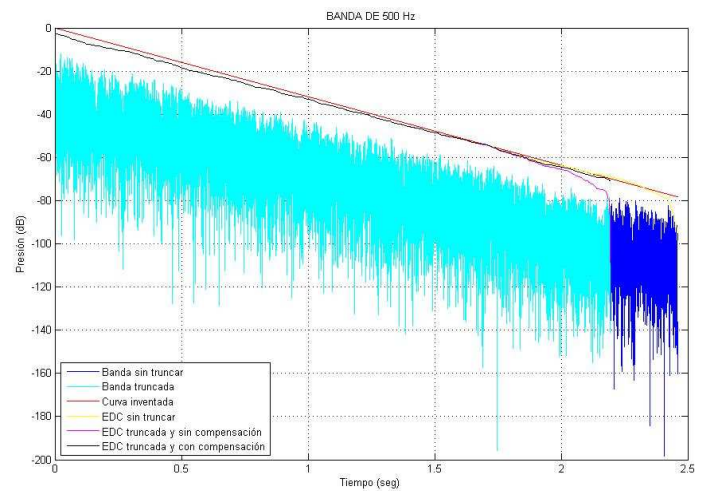
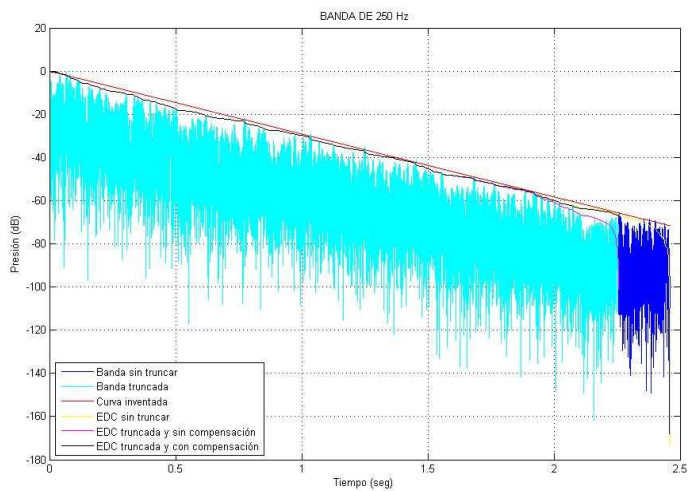


Figura 209. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

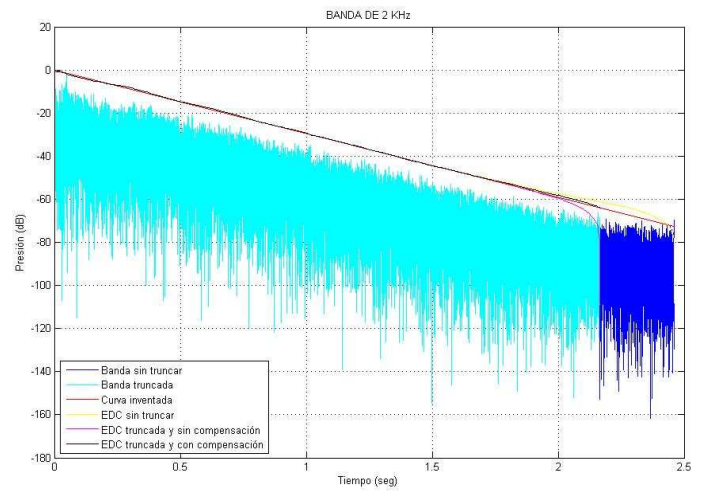
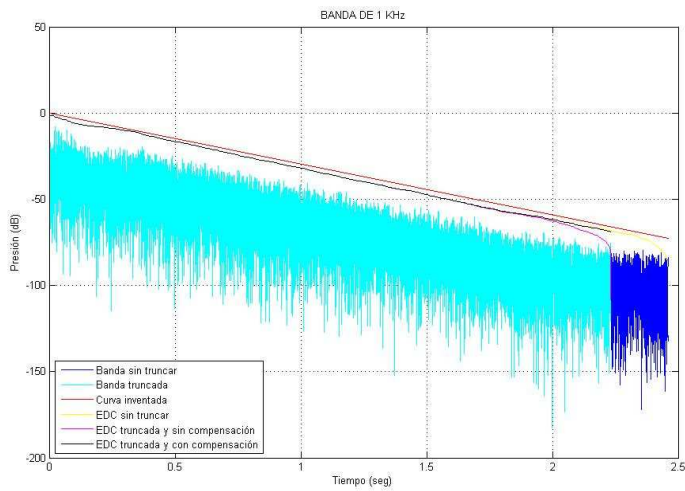


Figura 210. Curvas de decaimiento energético, bandas de 1 KHz y 2 KHz

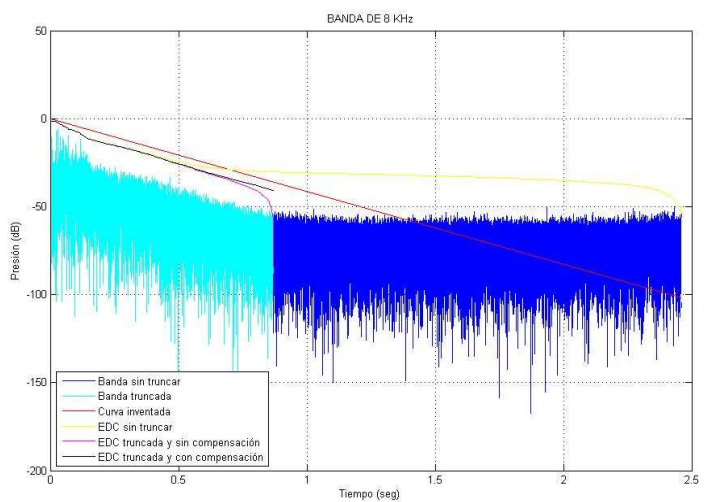
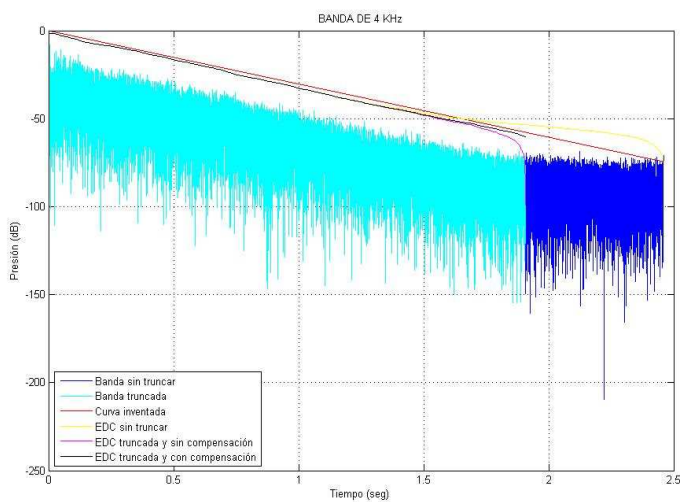


Figura 211. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada sin considerar la energía de compensación.

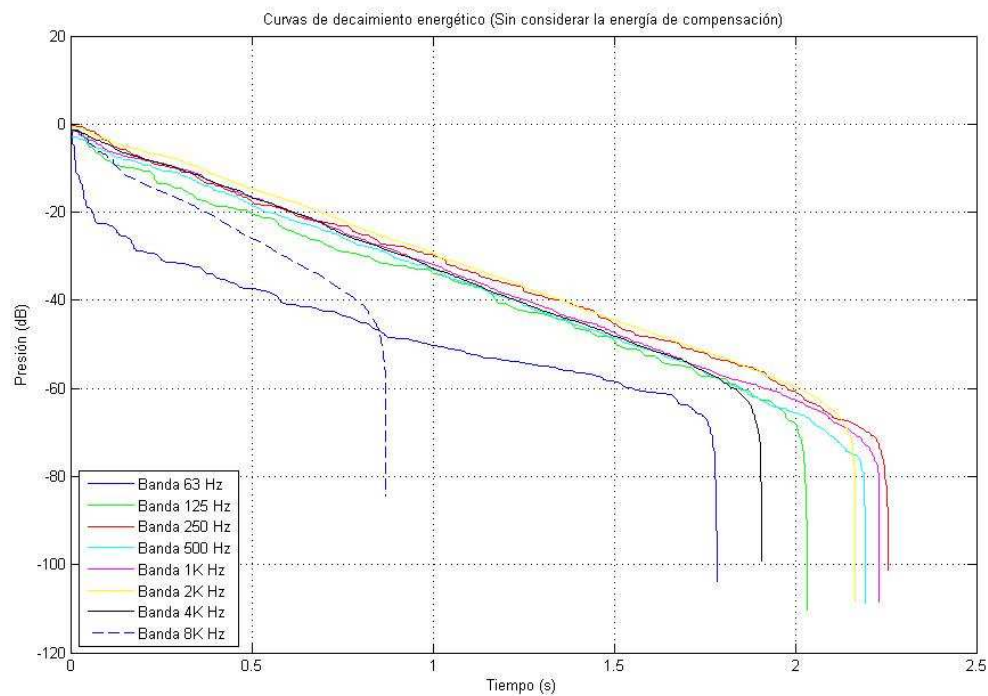


Figura 212. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

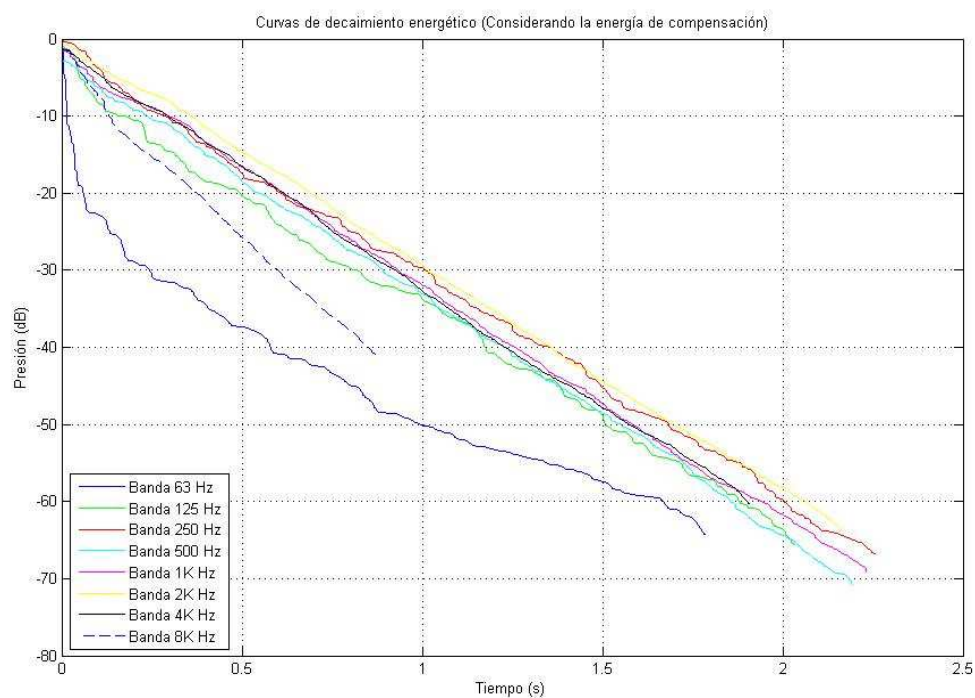


Figura 213. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

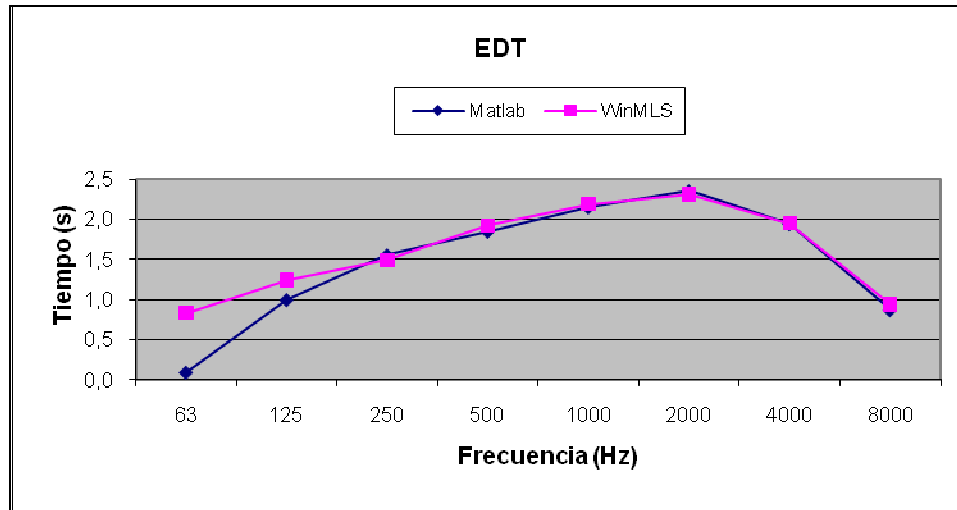


Figura 214. Comparativa EDT

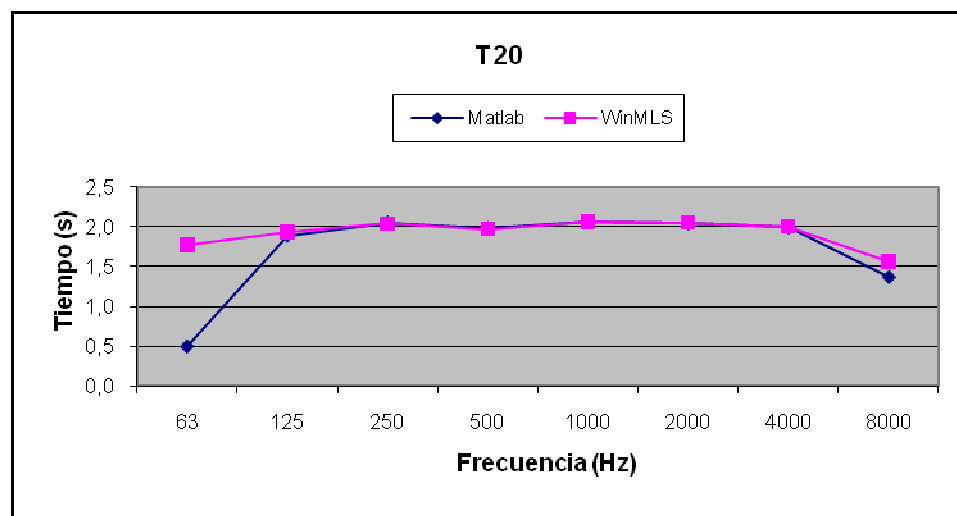


Figura 215. Comparativa T20

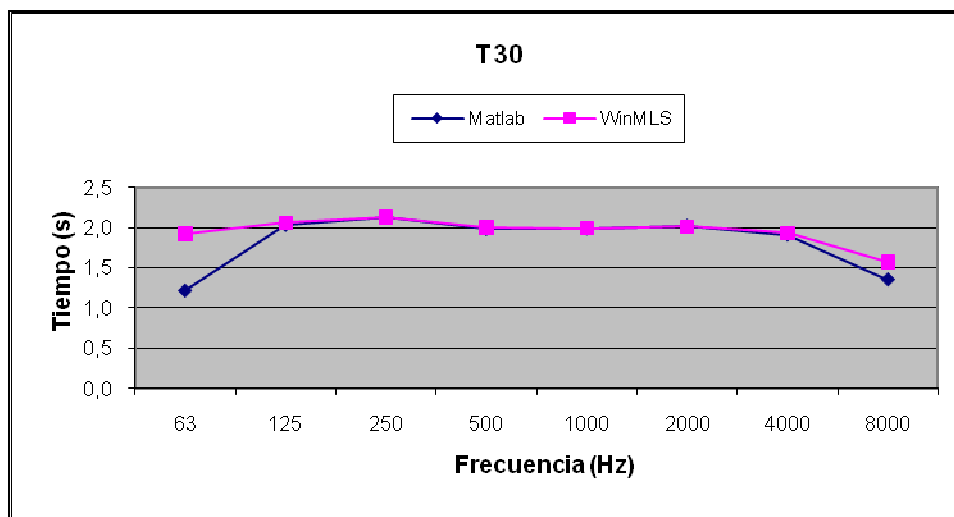


Figura 216. Comparativa T30

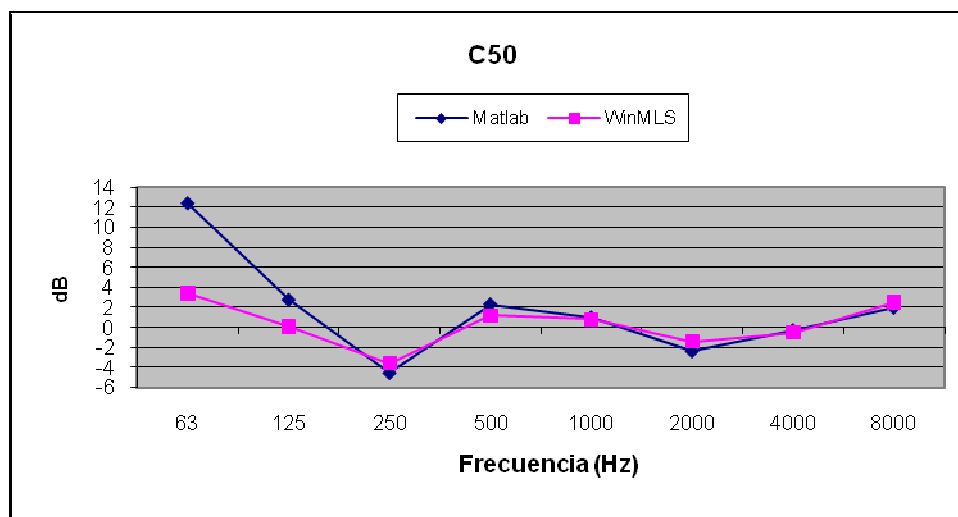


Figura 217. Comparativa C50

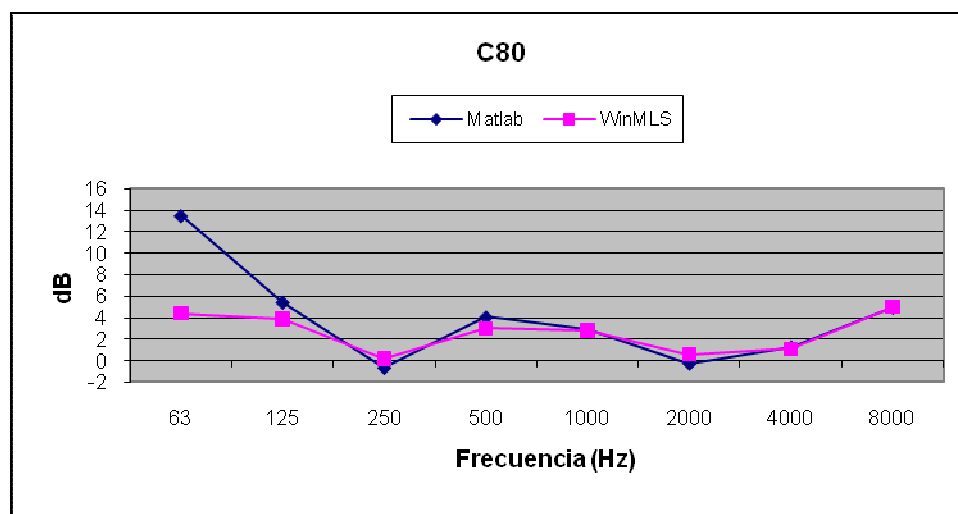


Figura 218. Comparativa C80

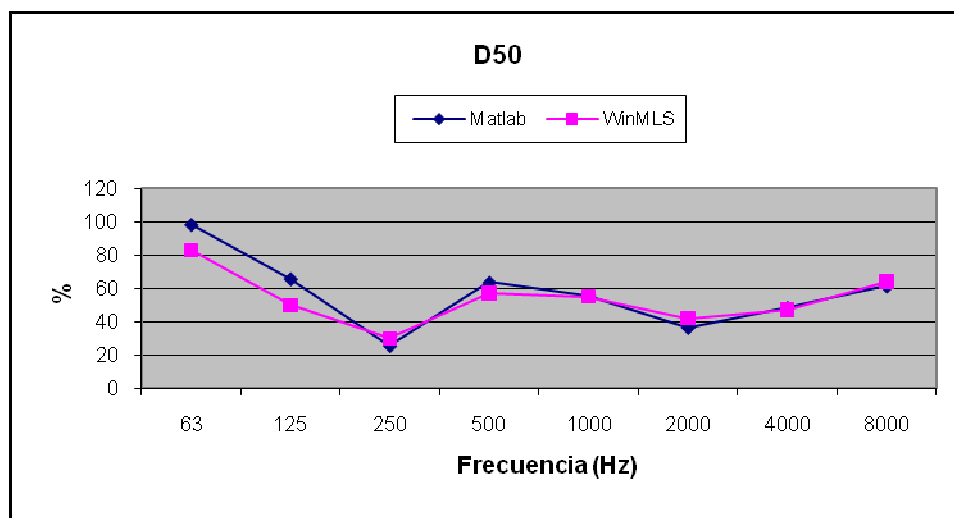


Figura 219. Comparativa D50

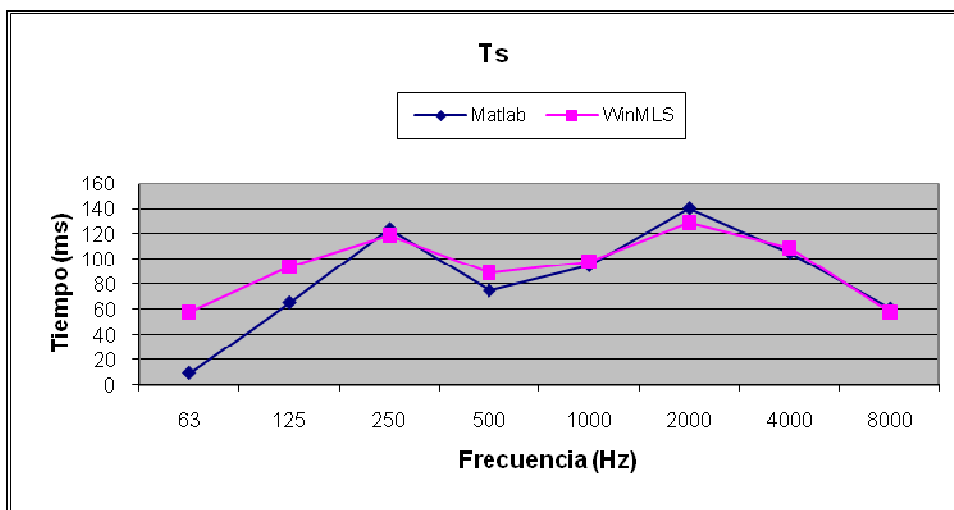


Figura 220. Comparativa Ts

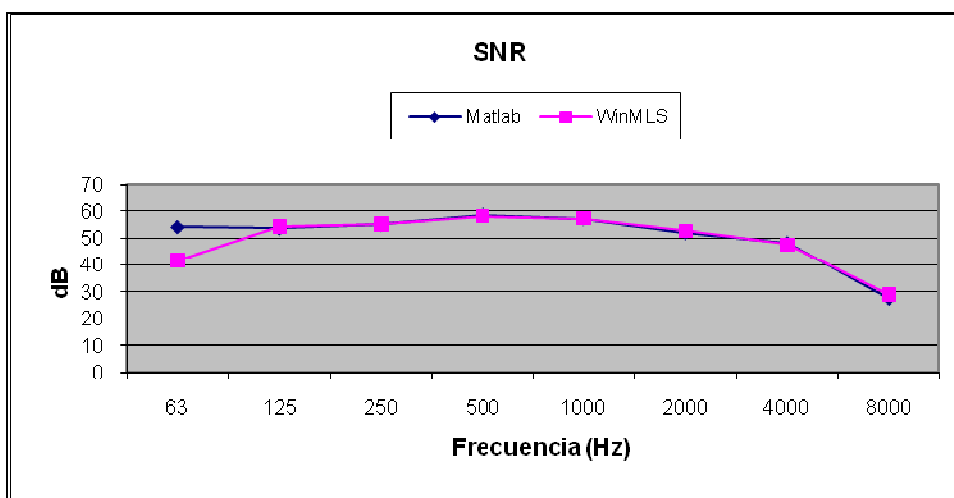


Figura 221. Comparativa SNR

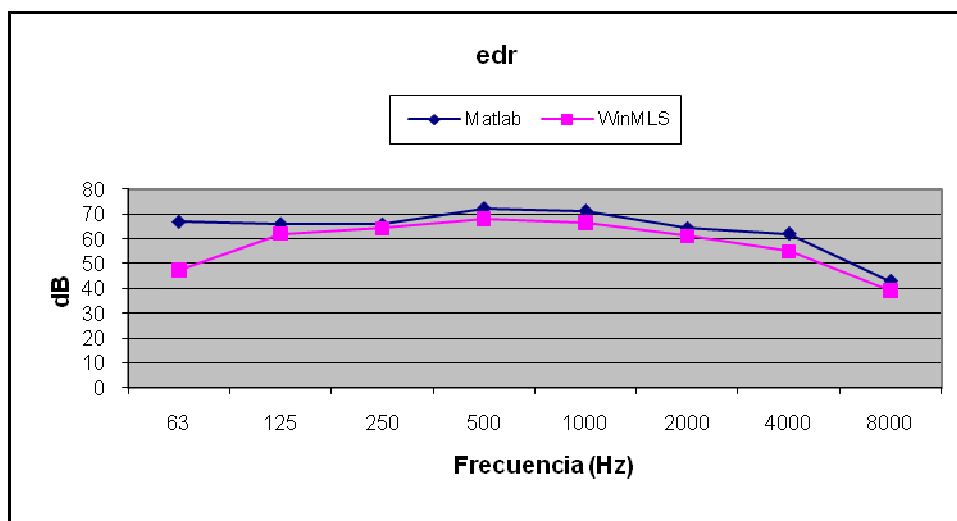


Figura 222. Comparativa edr

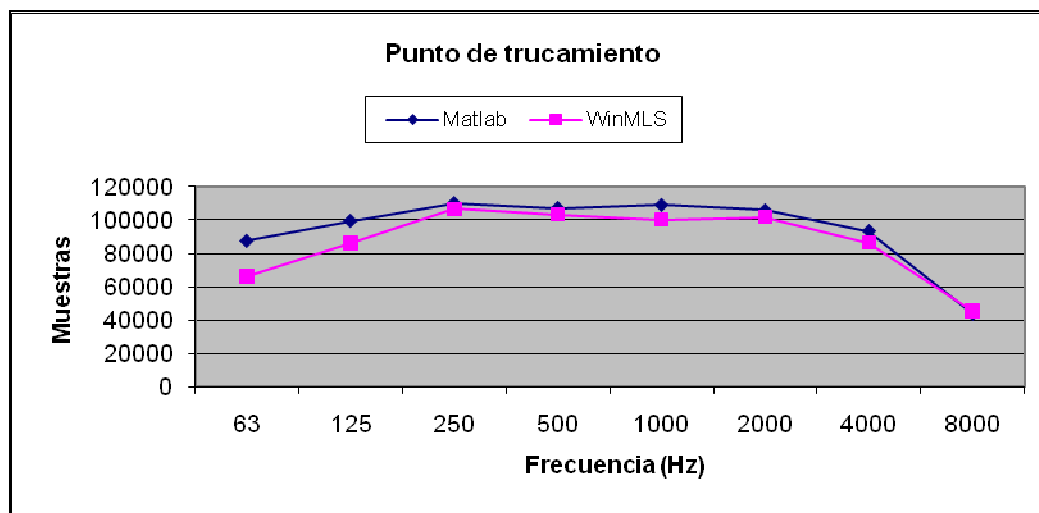


Figura 223. Comparativa punto de truncamiento

Señal “Ch1_47_S1_4_GT1”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

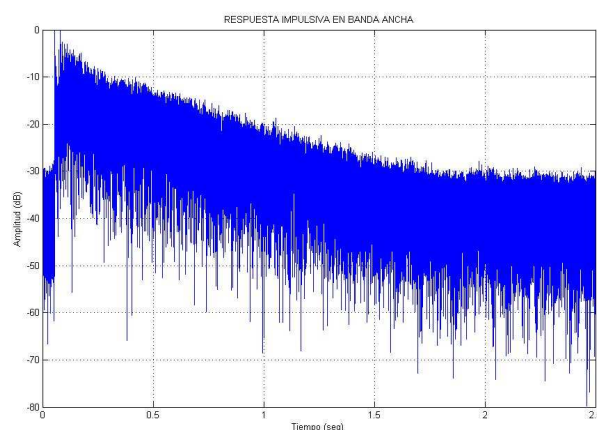
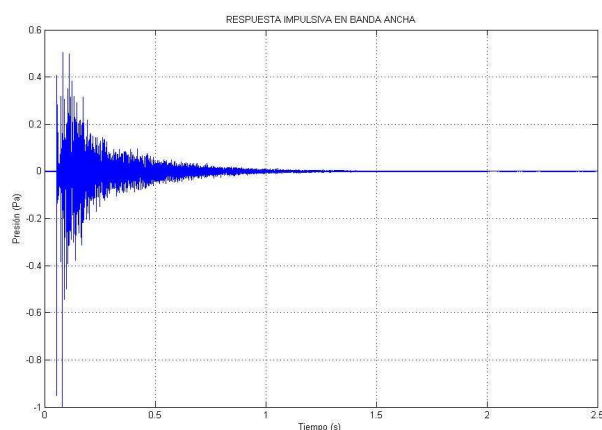


Figura 224. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

A continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

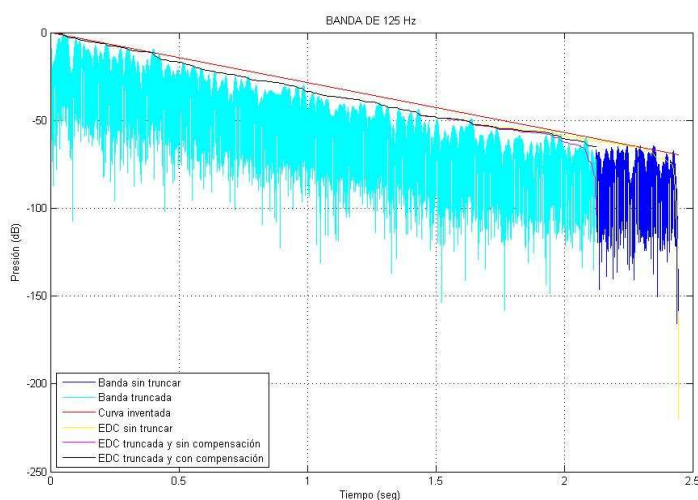
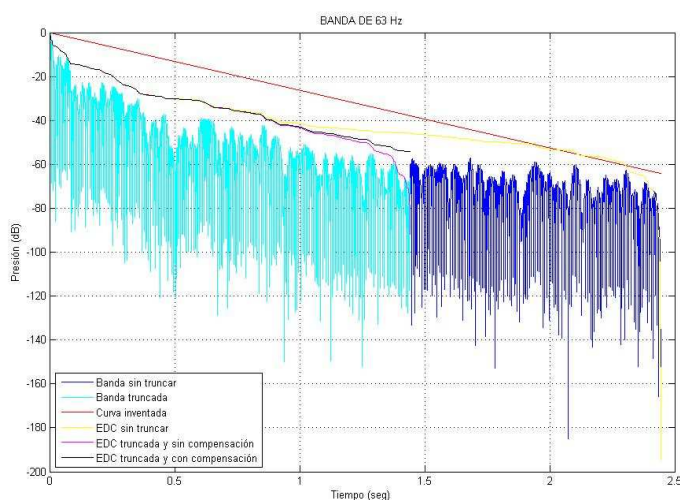


Figura 225. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

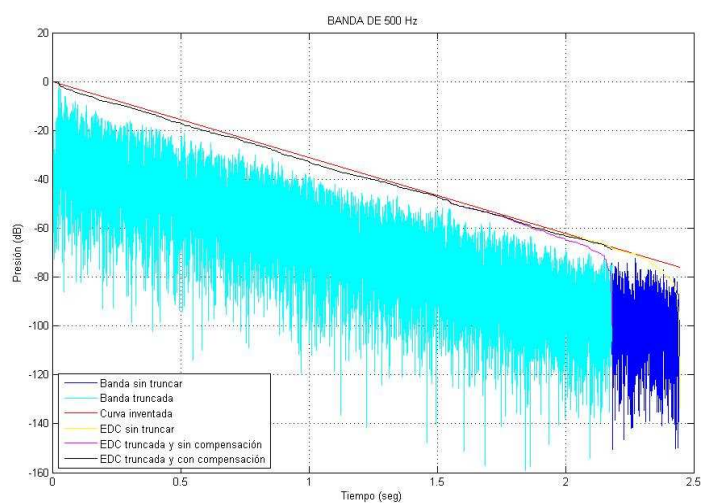
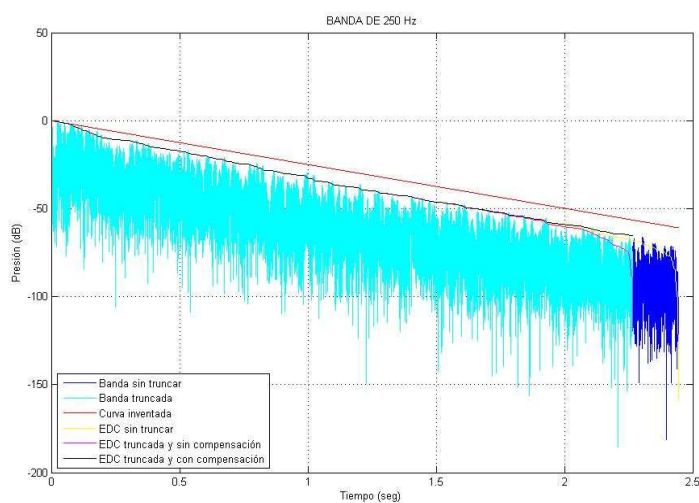


Figura 226. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

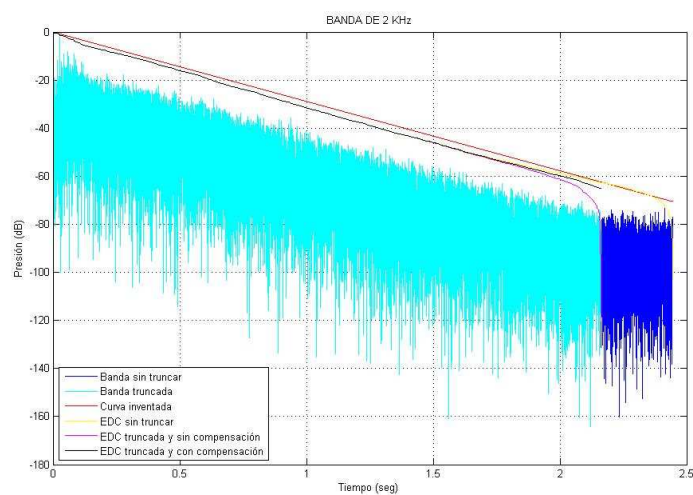
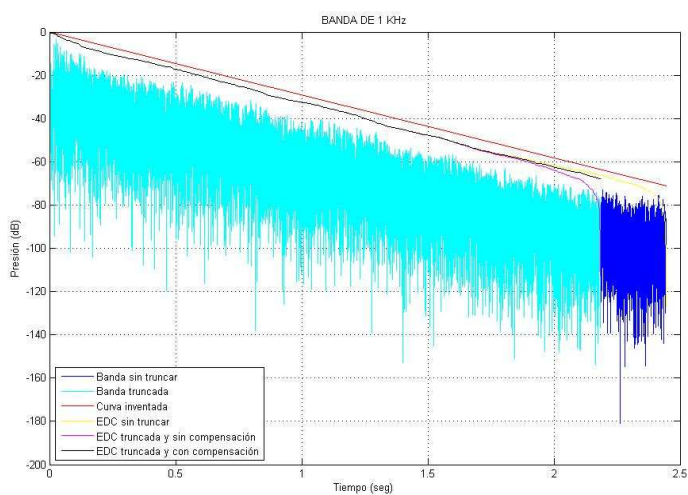


Figura 227. Curvas de decaimiento energético, bandas de 1 KHz y 2 KHz

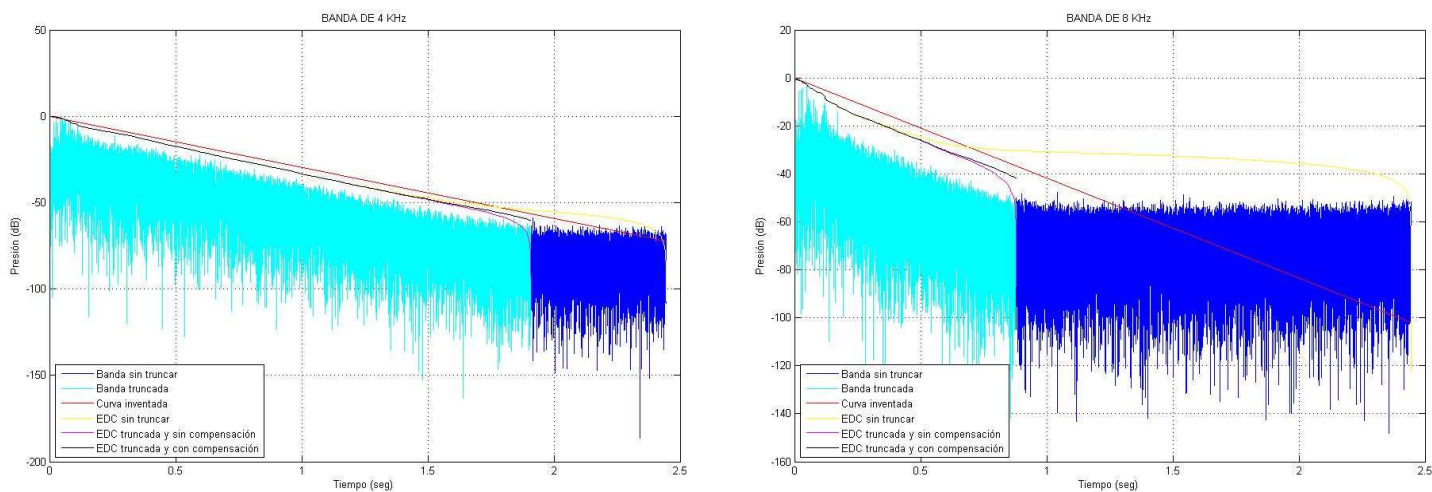


Figura 228. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada sin considerar la energía de compensación.

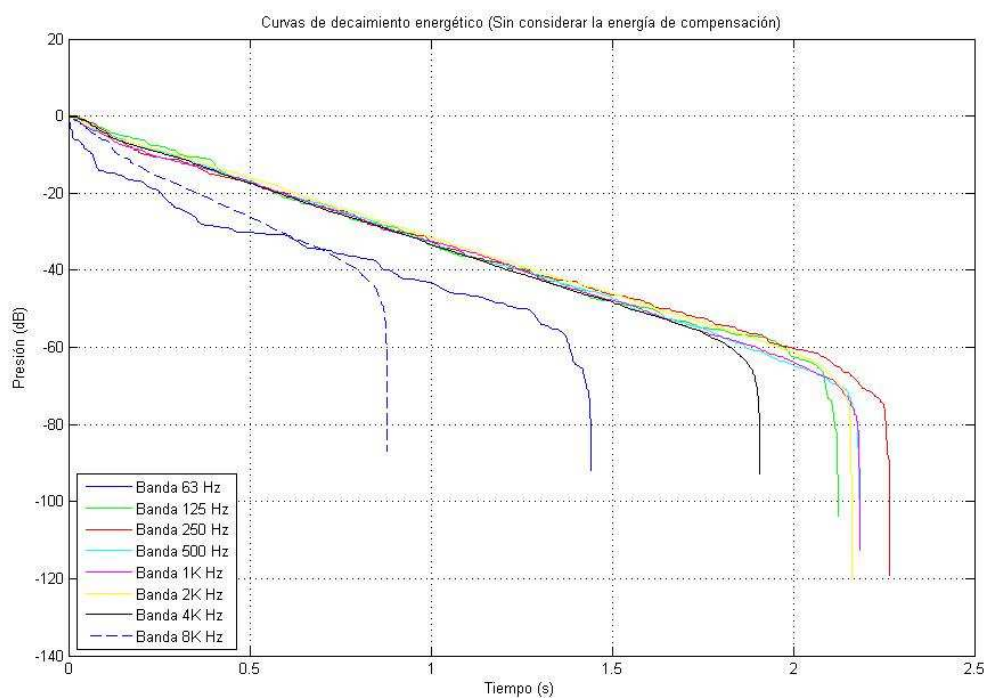


Figura 229. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

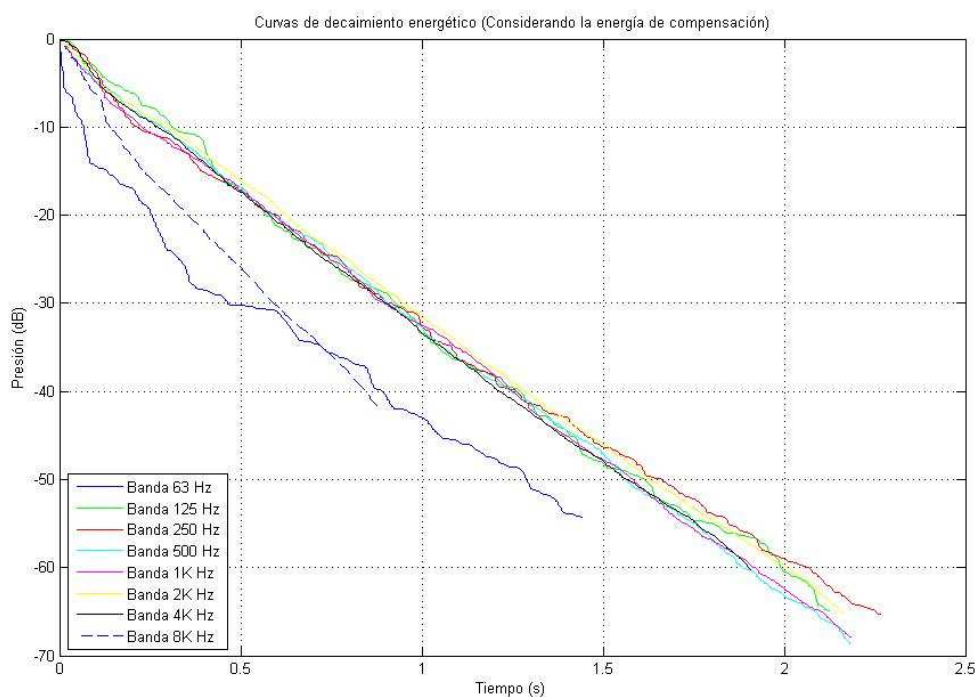


Figura 230. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

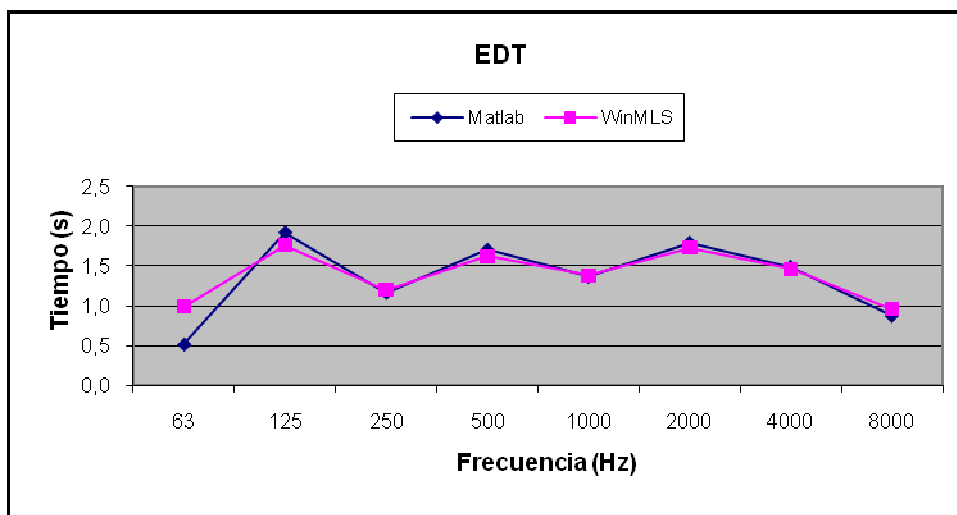


Figura 231. Comparativa EDT

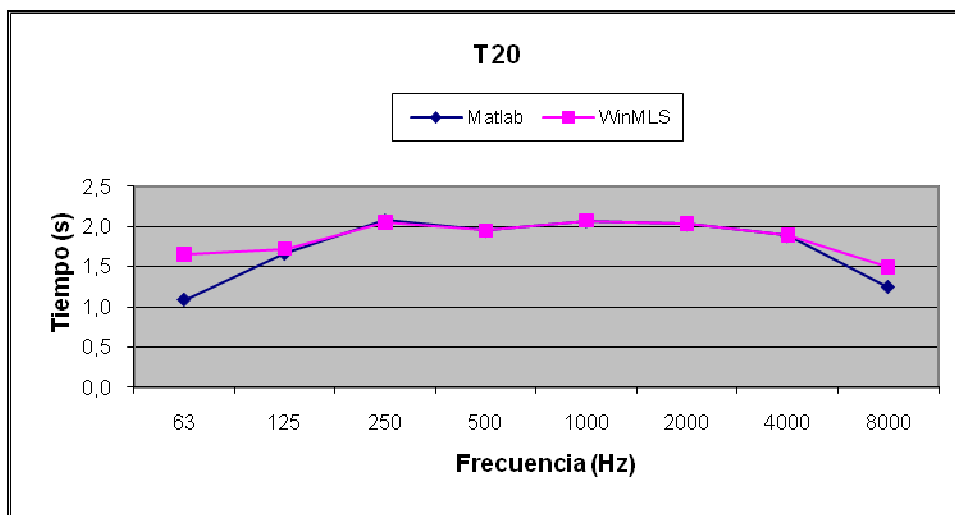


Figura 232. Comparativa T20

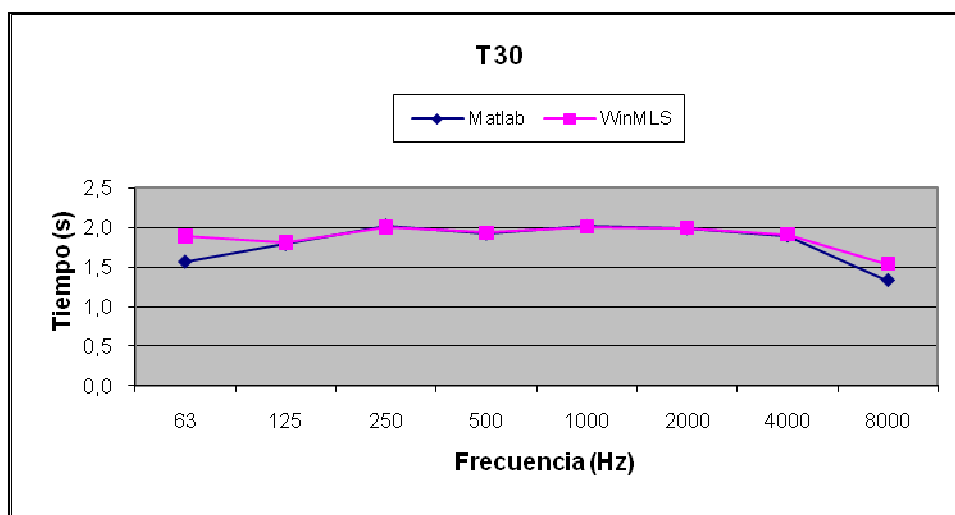


Figura 233. Comparativa T30

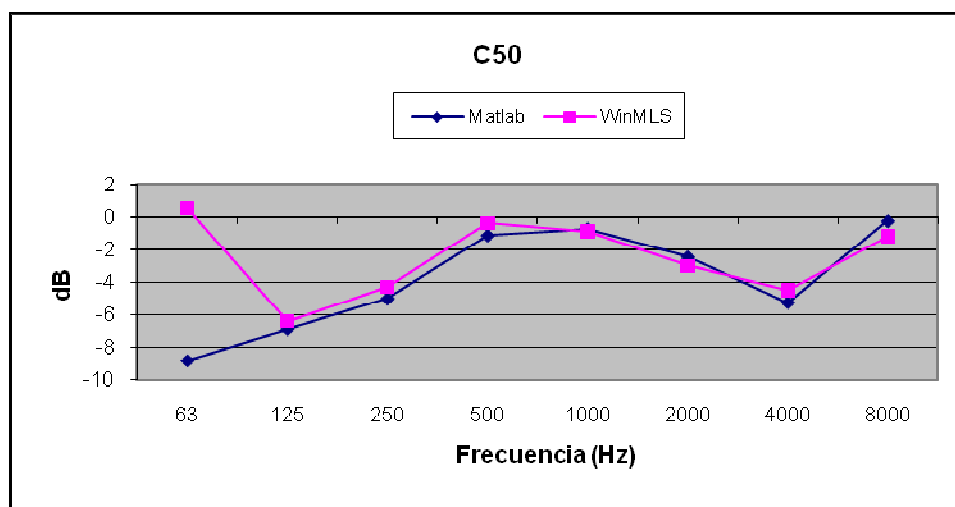


Figura 234. Comparativa C50

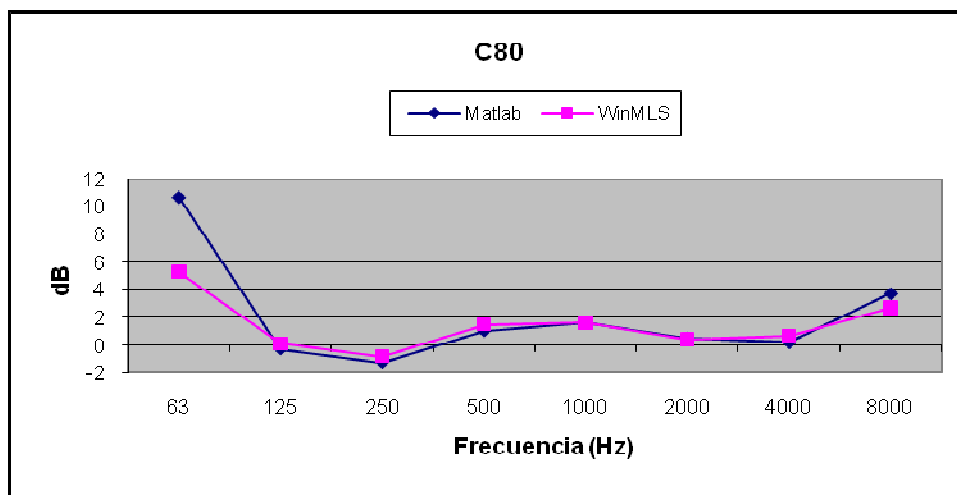


Figura 235. Comparativa C80

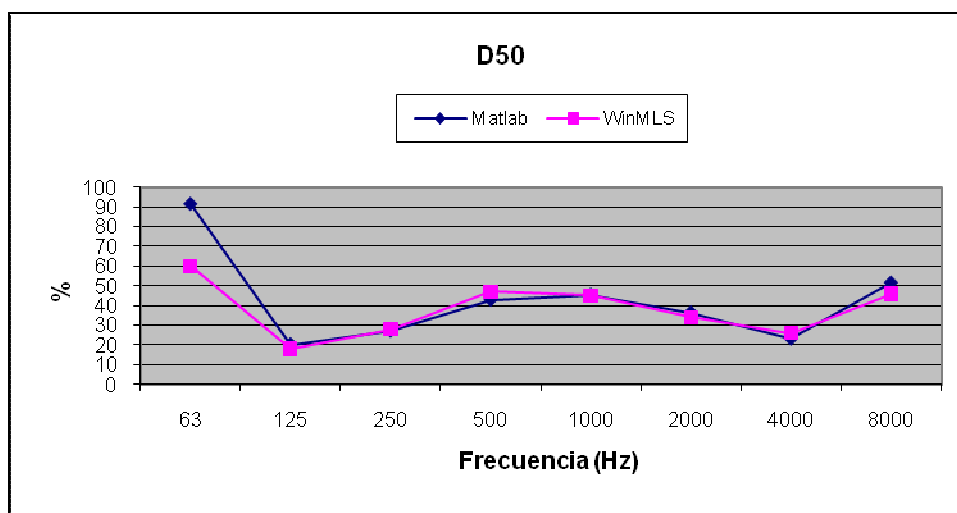


Figura 236. Comparativa D50

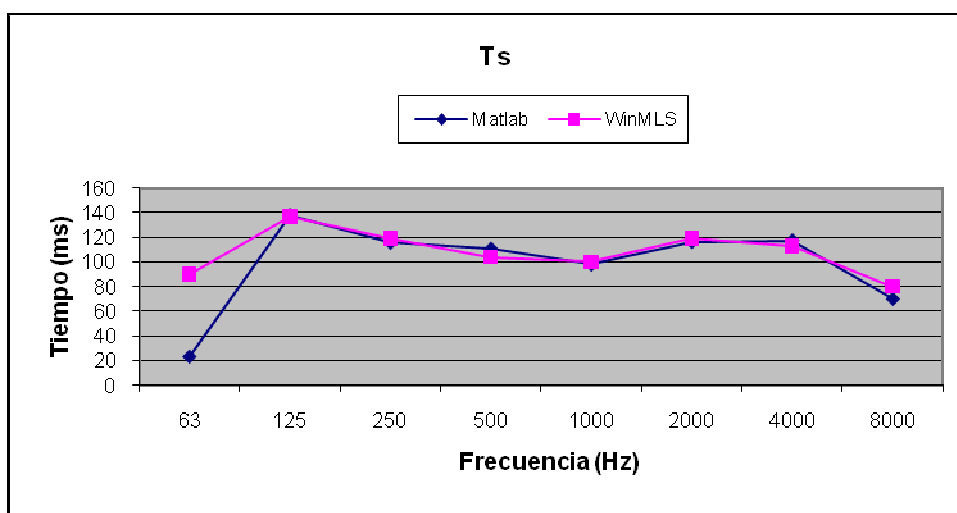


Figura 237. Comparativa Ts

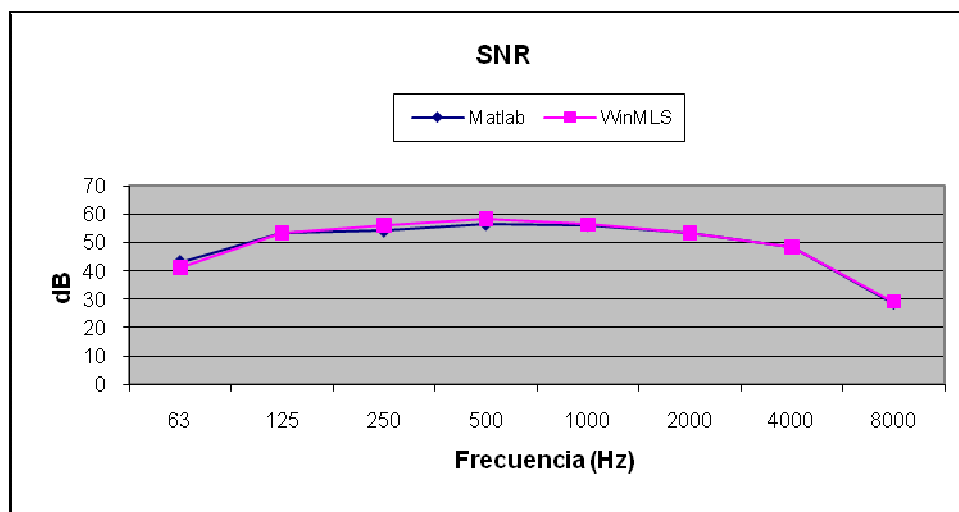


Figura 238. Comparativa SNR

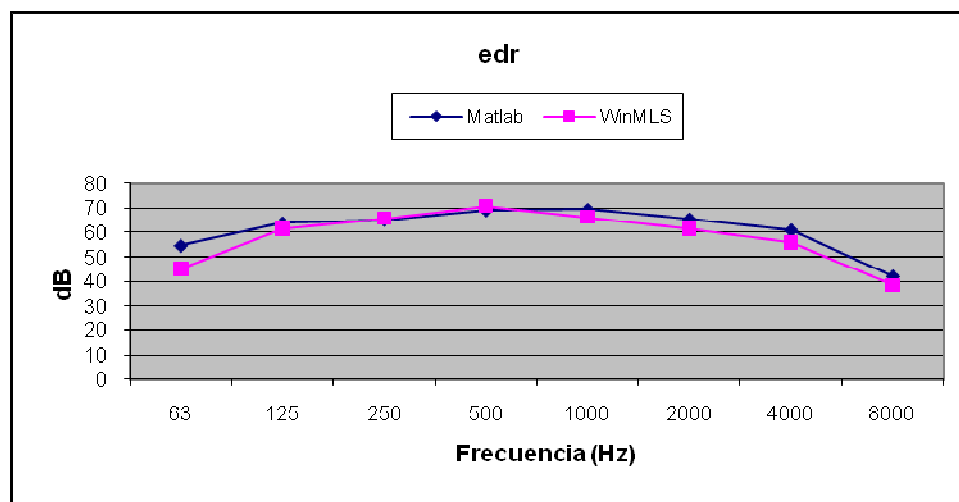


Figura 239. Comparativa edr

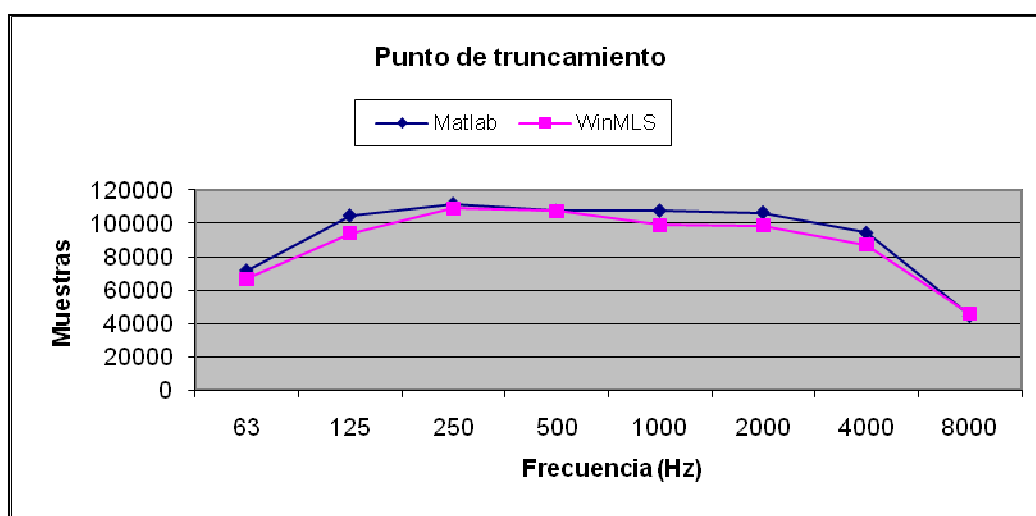


Figura 240. Comparativa punto de truncamiento

Auditorio Mozart

Se realiza el estudio de dos señales diferentes captadas en el *Auditorio Mozart* con un TR_{mid} de 2,8 segundos

Señal “Ch1_9_S1_3_GT1”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

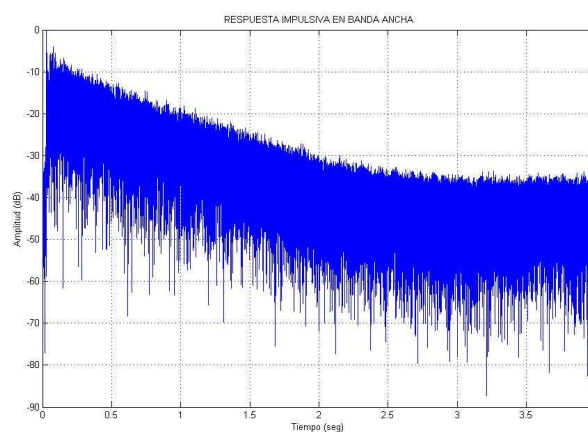
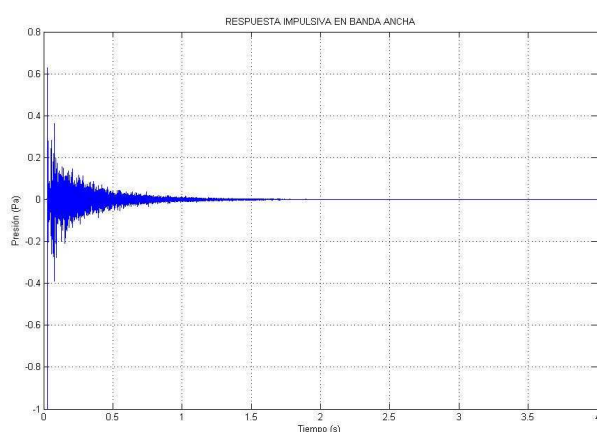


Figura 241. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

A continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

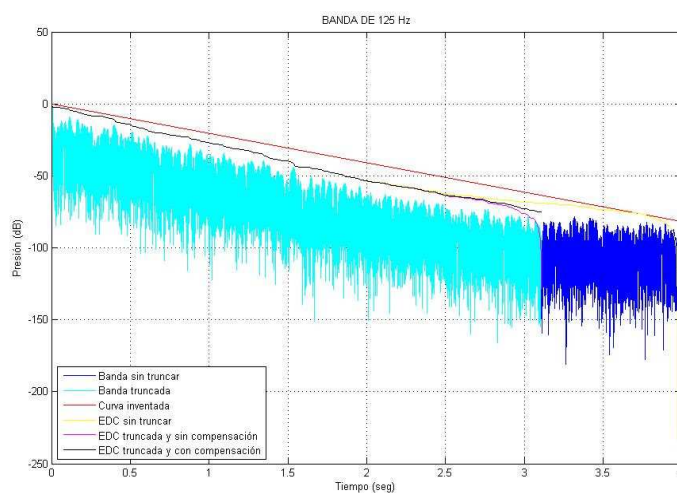
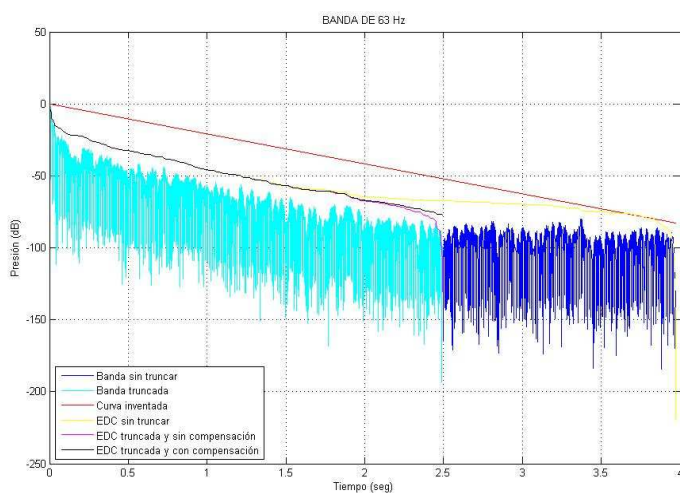


Figura 242. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

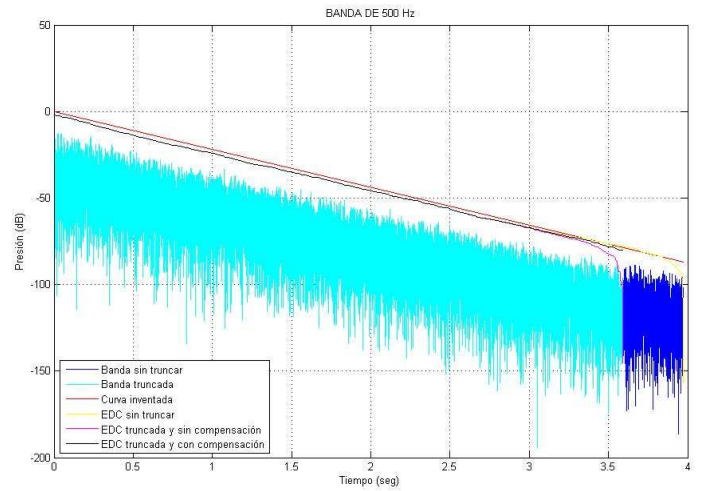
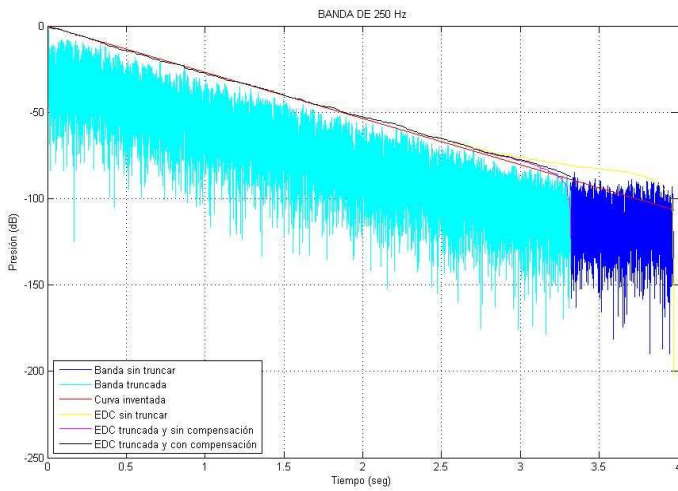


Figura 243. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

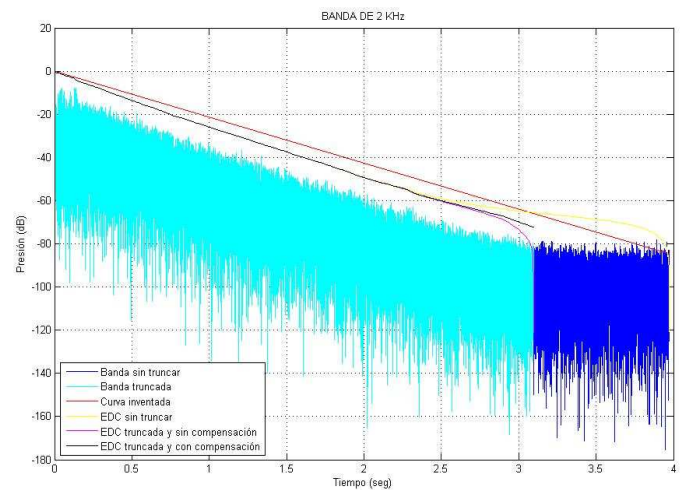
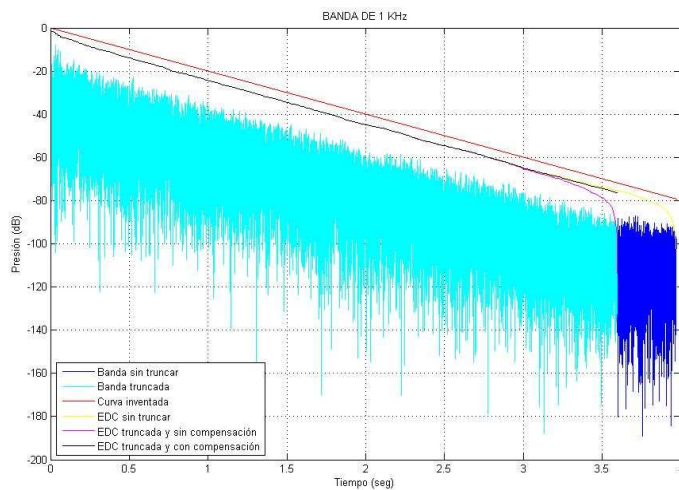


Figura 244. Curvas de decaimiento energético, bandas de 1 KHz y 2 KHz

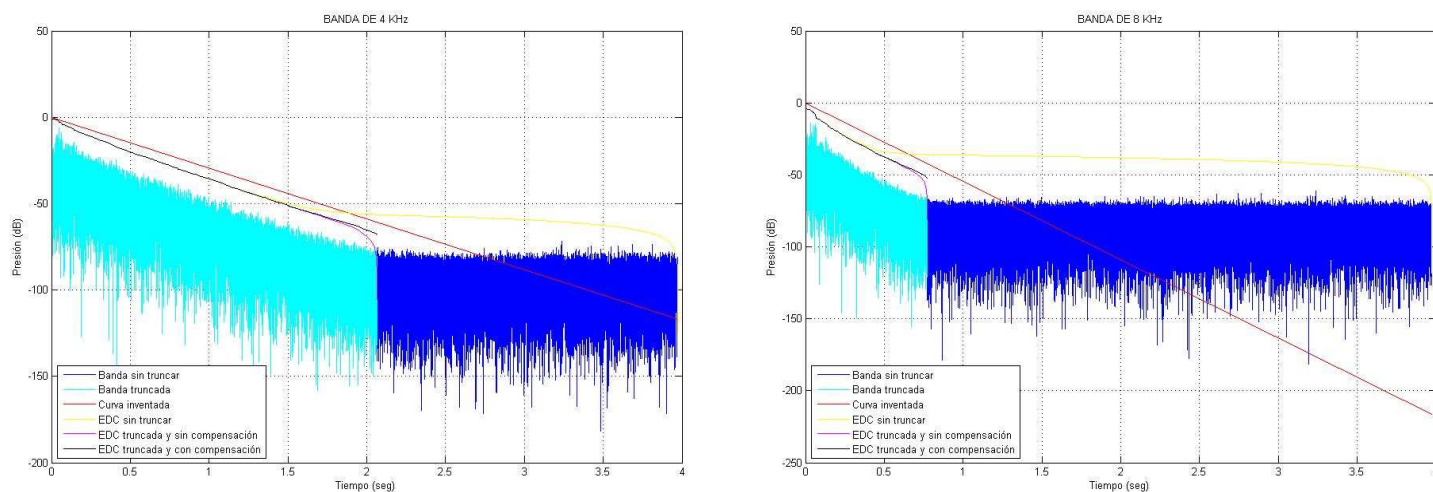


Figura 245. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada sin considerar la energía de compensación.

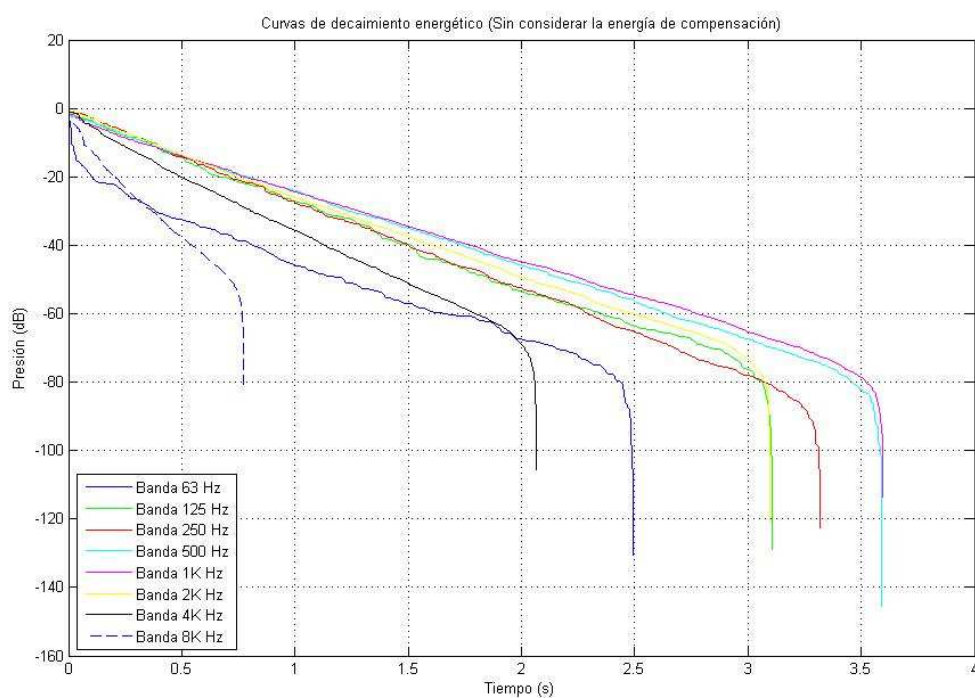


Figura 246. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

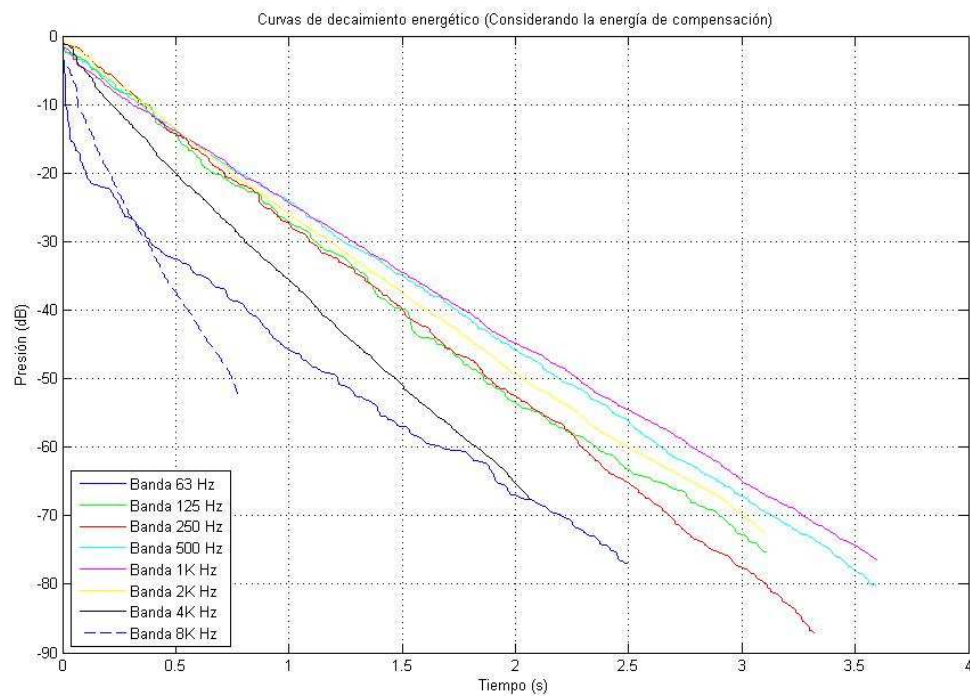


Figura 247. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

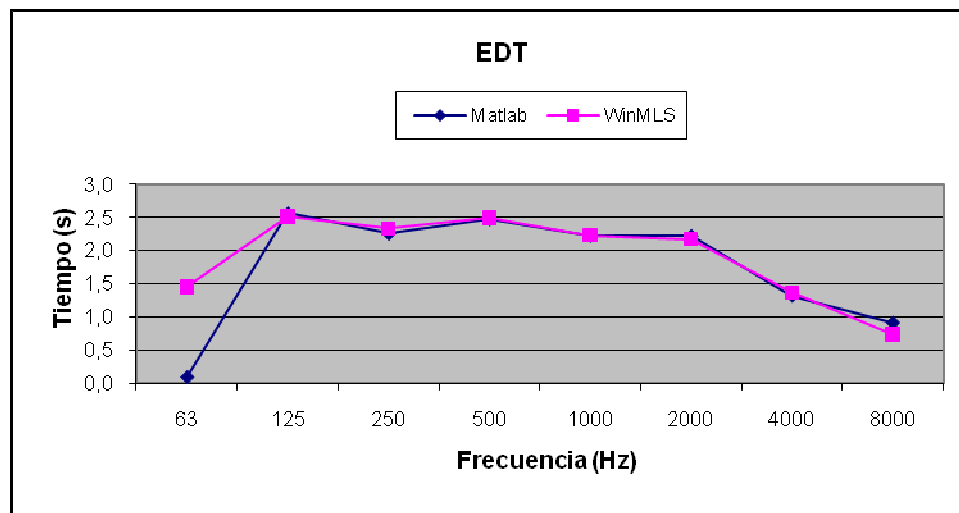


Figura 248. Comparativa EDT

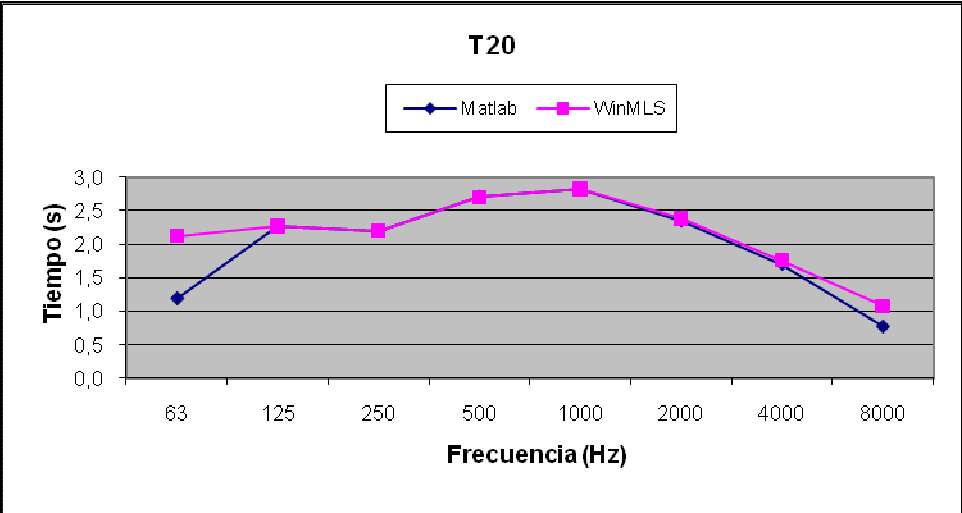


Figura 249. Comparativa T20

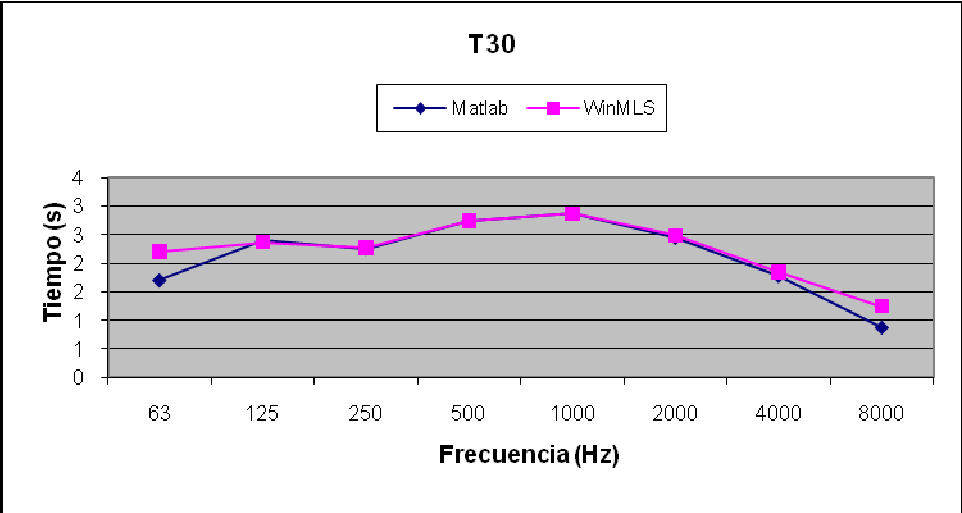


Figura 250. Comparativa T30

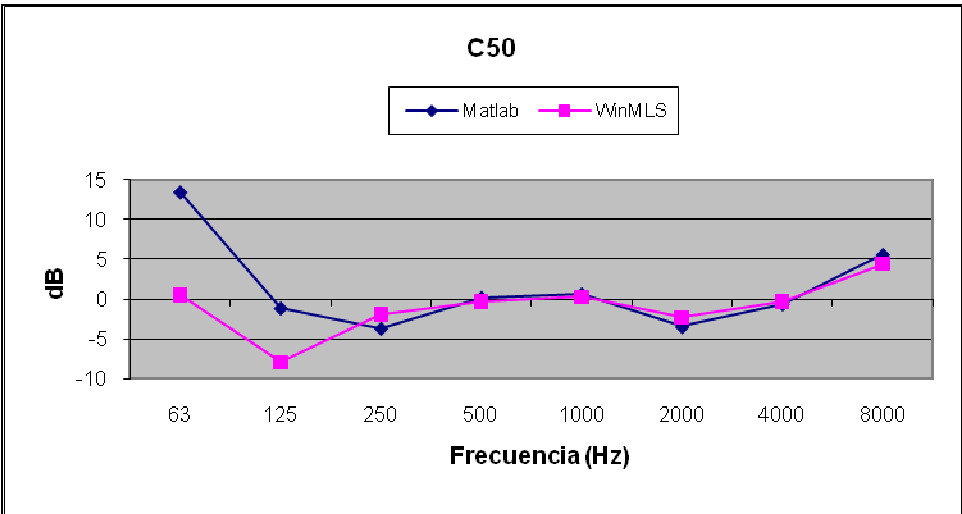


Figura 251. Comparativa C50

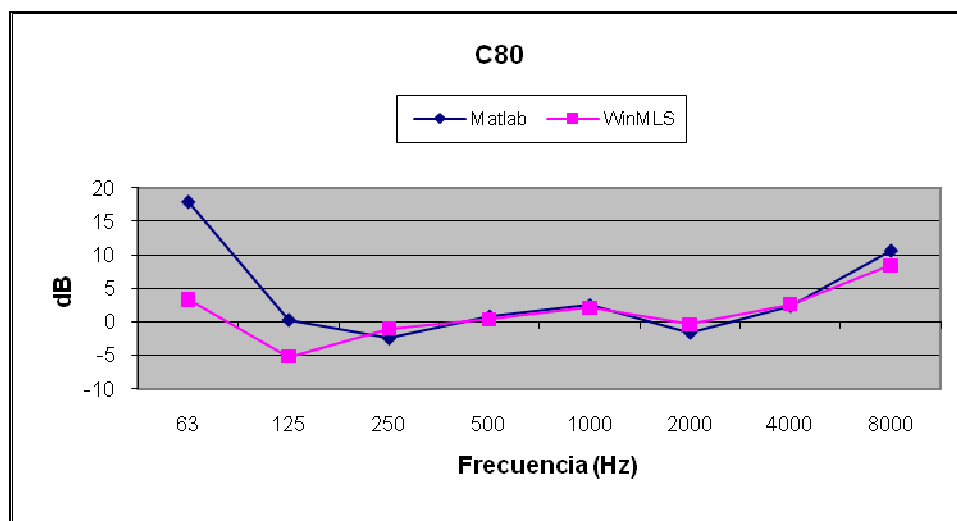


Figura 252. Comparativa C80

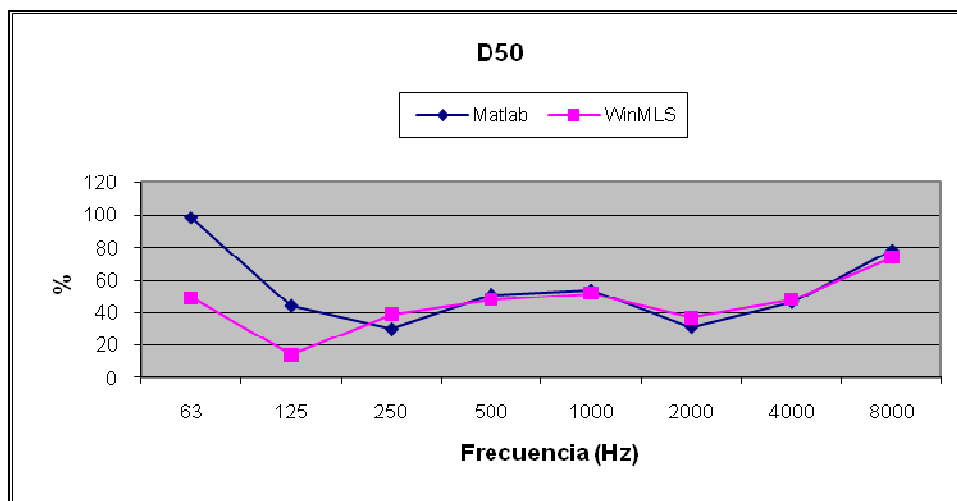


Figura 253. Comparativa D50

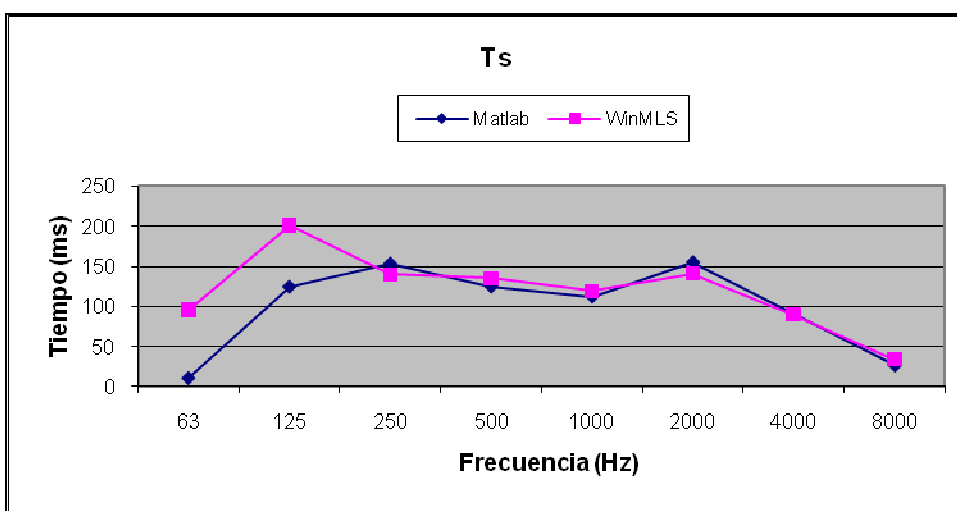


Figura 254. Comparativa Ts

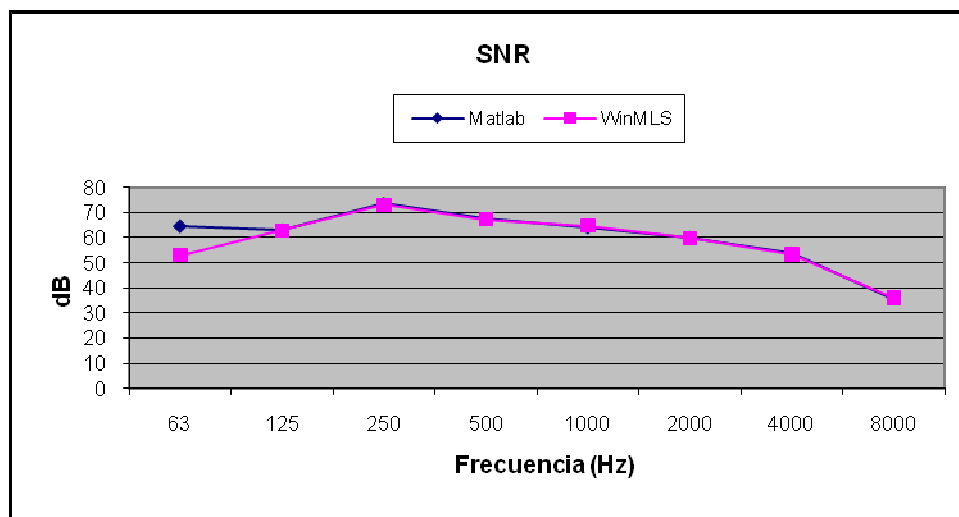


Figura 255. Comparativa SNR

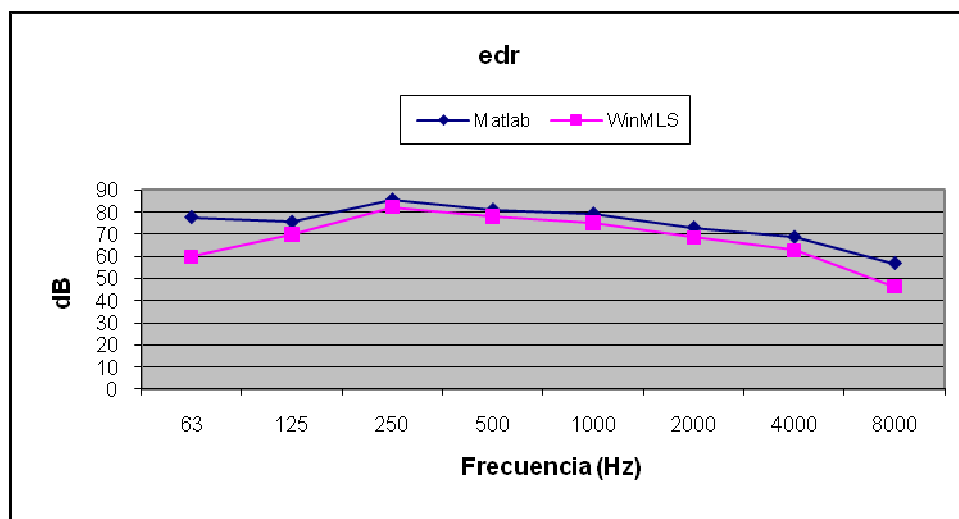


Figura 256. Comparativa edr

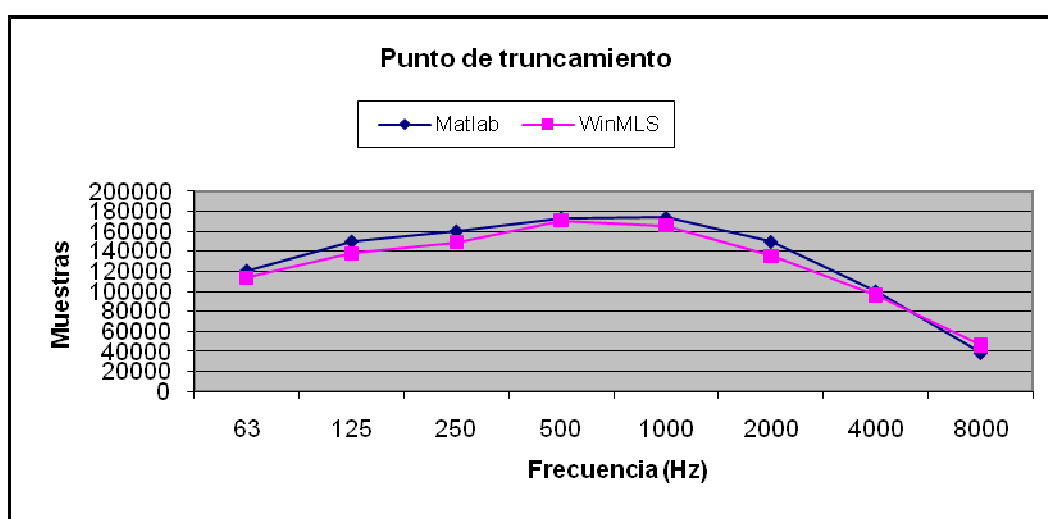


Figura 257. Comparativa punto de truncamiento

Señal “Ch1_23_S1_14_GT1”

Captura de la respuesta impulsiva

A continuación se presenta la captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica.

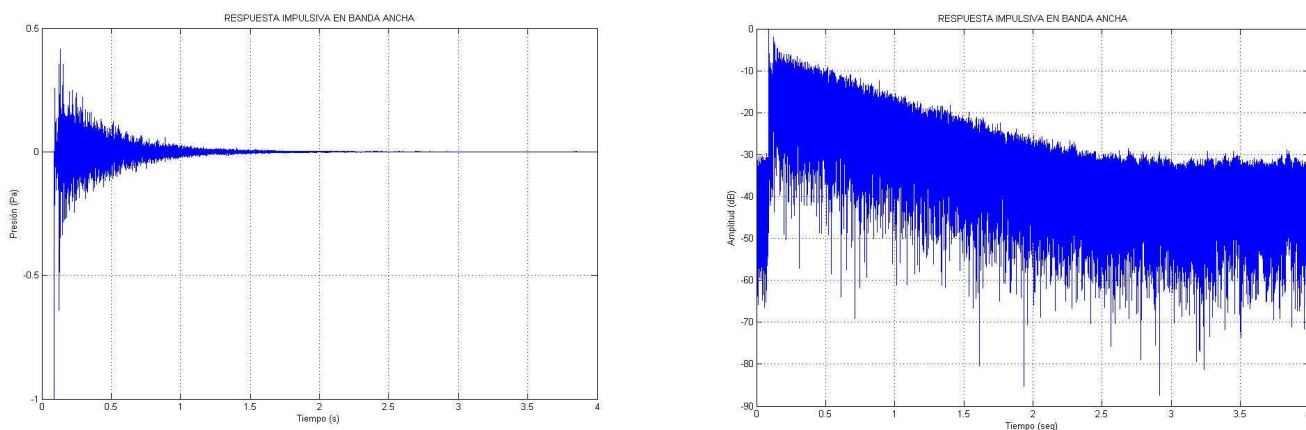


Figura 258. Captura de la respuesta impulsiva en escala lineal y logarítmica

Curva de decaimiento energético

A continuación se muestra en escala logarítmica, los resultados obtenidos tras el proceso de truncamiento. Se exponen las curvas de decaimiento energético, considerando el truncamiento y la energía de compensación. Se aprecia claramente la influencia de dicho procedimiento, sobre cada una de las bandas de octava analizadas.

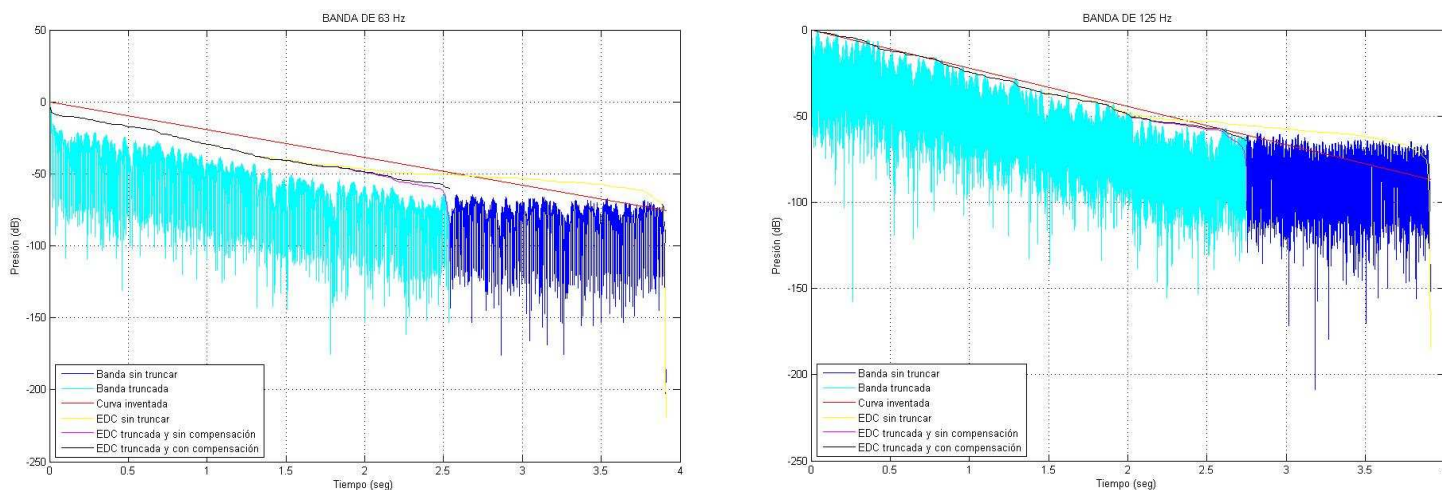


Figura 259. Curvas de decaimiento energético, bandas de 63 Hz y 125 Hz

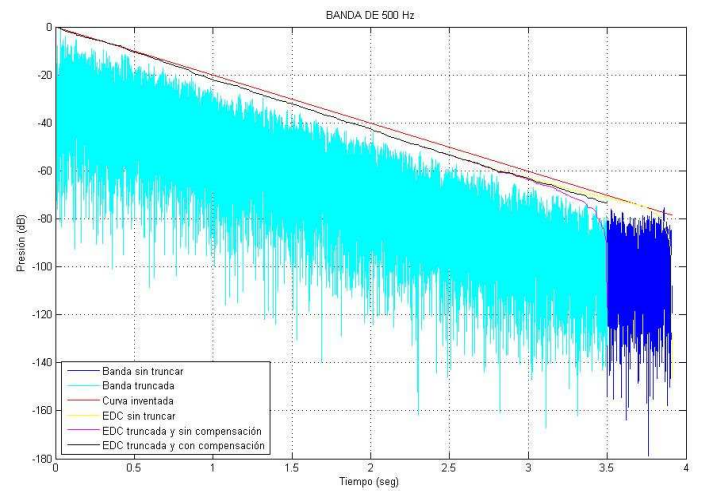
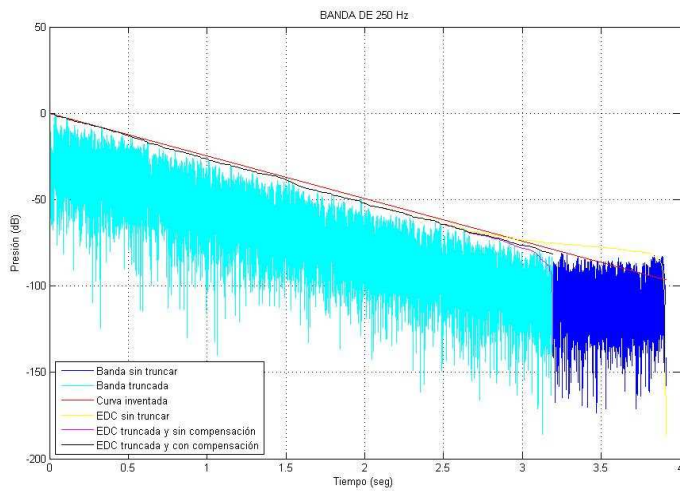


Figura 260. Curvas de decaimiento energético, bandas de 250 Hz y 500 Hz

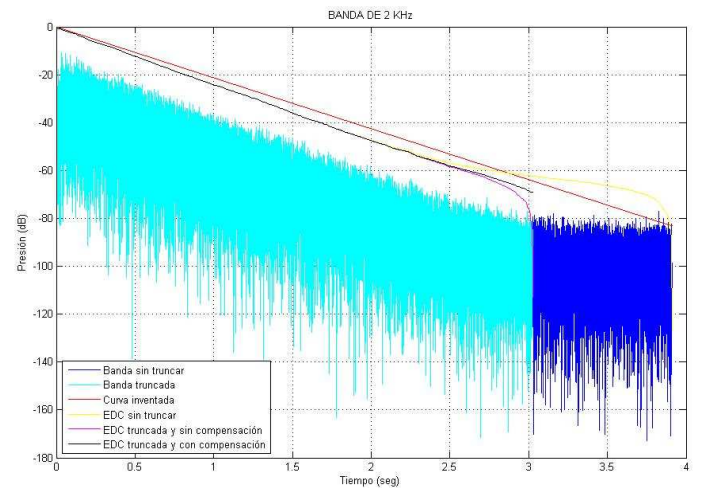
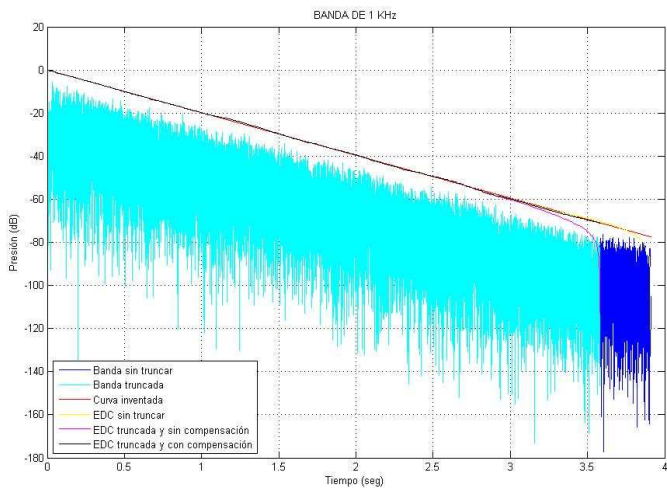


Figura 261. Curvas de decaimiento energético, bandas de 1 KHz y 2 KHz

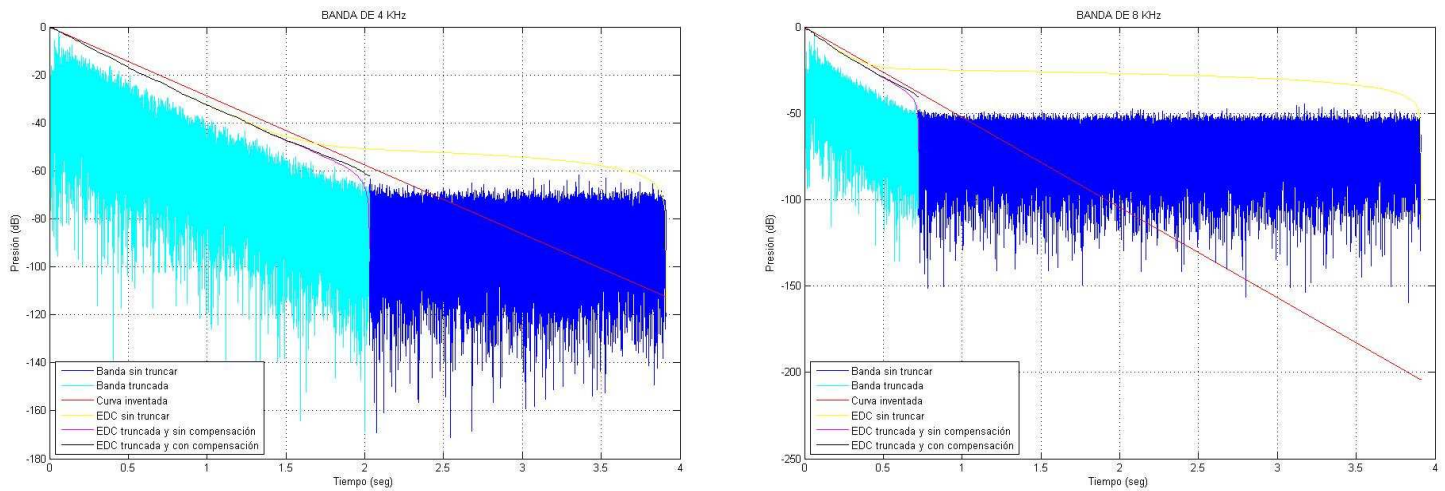


Figura 262. Curvas de decaimiento energético, bandas de 4 KHz y 8 KHz

En la siguiente gráfica se observa las curvas de decaimiento energético de cada banda de octava truncada sin considerar la energía de compensación.

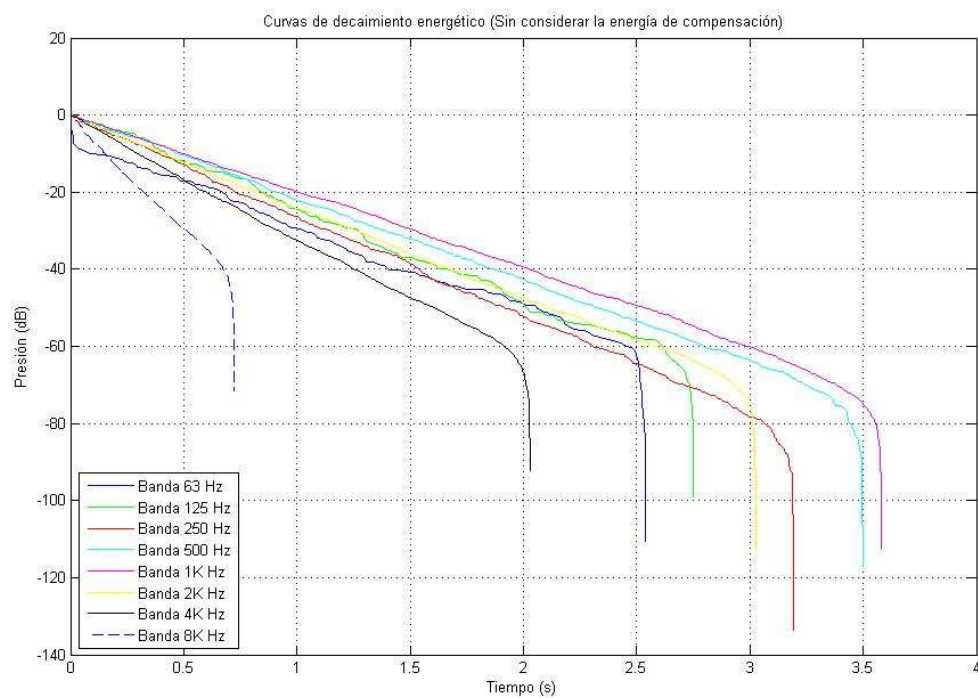


Figura 263. Curvas de decaimiento energético sin compensación

A continuación se representan las mismas curvas de decaimiento, pero en este caso considerando la energía de compensación.

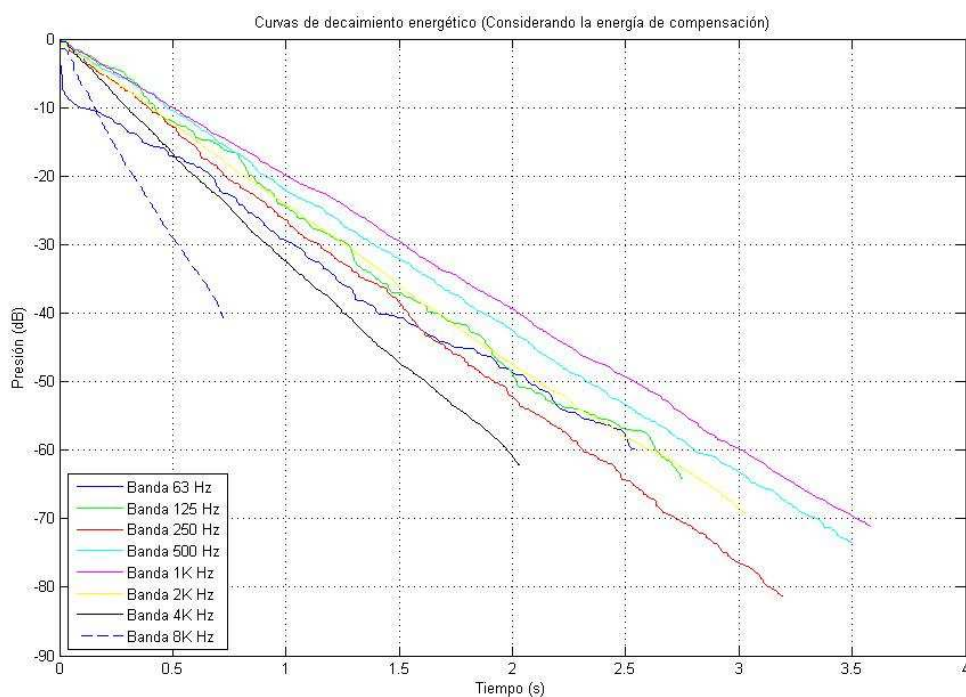


Figura 264. Curvas de decaimiento energético con compensación

Comparativa con el programa WinMLS

Se realiza una comparativa gráfica de todos los parámetros definidos por el algoritmo diseñado con el programa *WinMLS*.

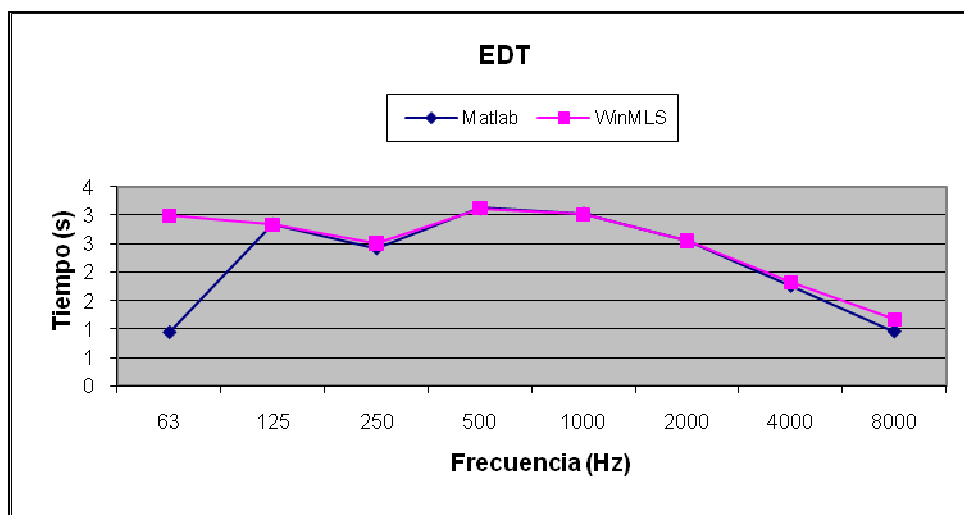


Figura 265. Comparativa EDT

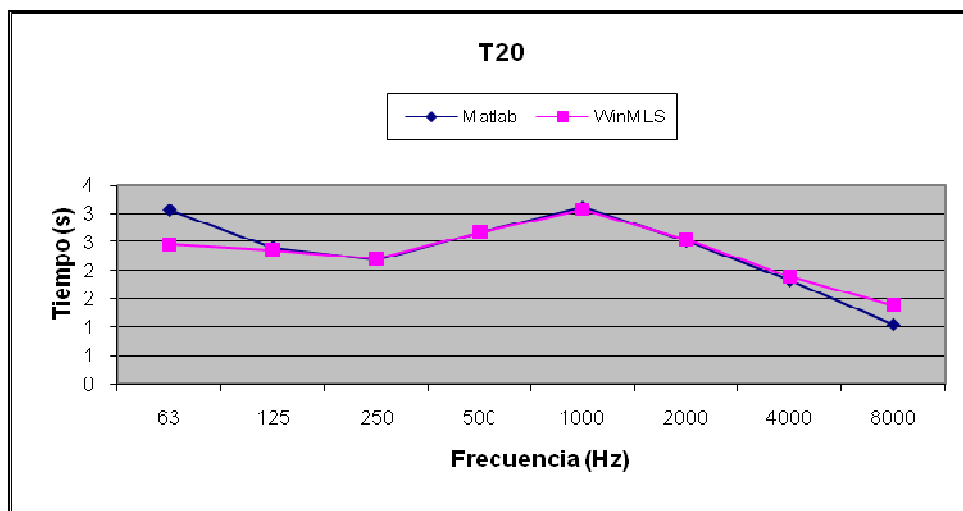


Figura 266. Comparativa T20

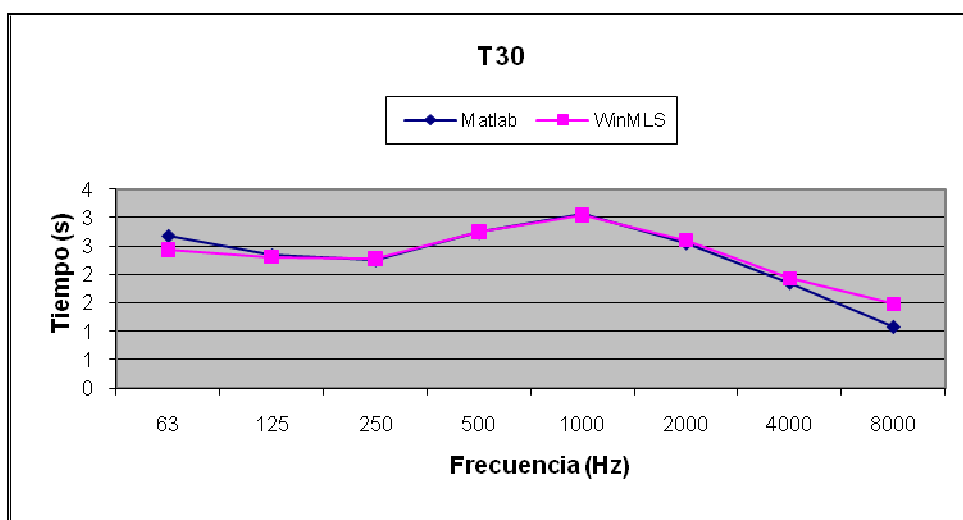


Figura 267. Comparativa T30

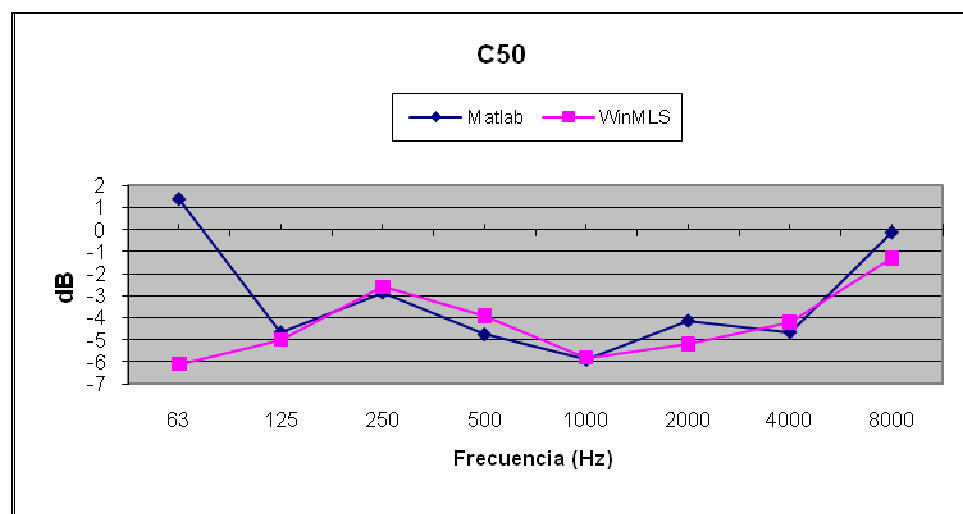


Figura 268. Comparativa C50

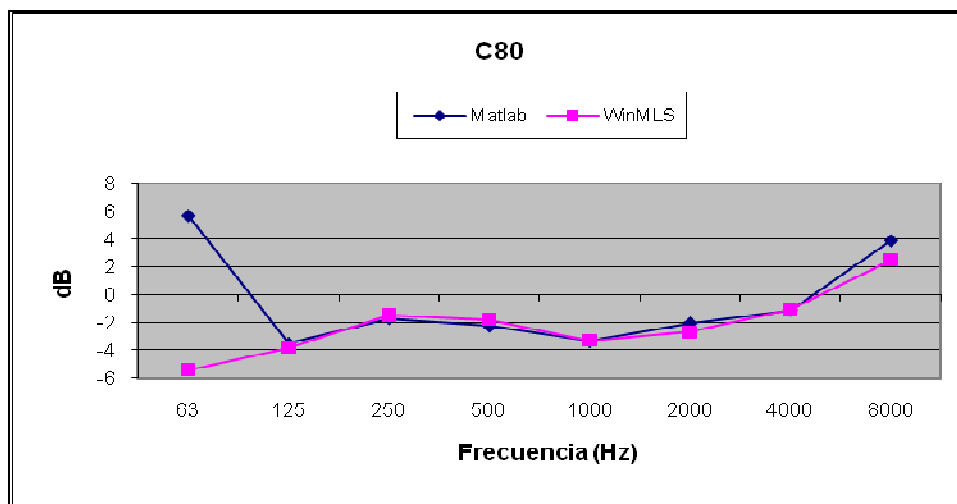


Figura 269. Comparativa C80

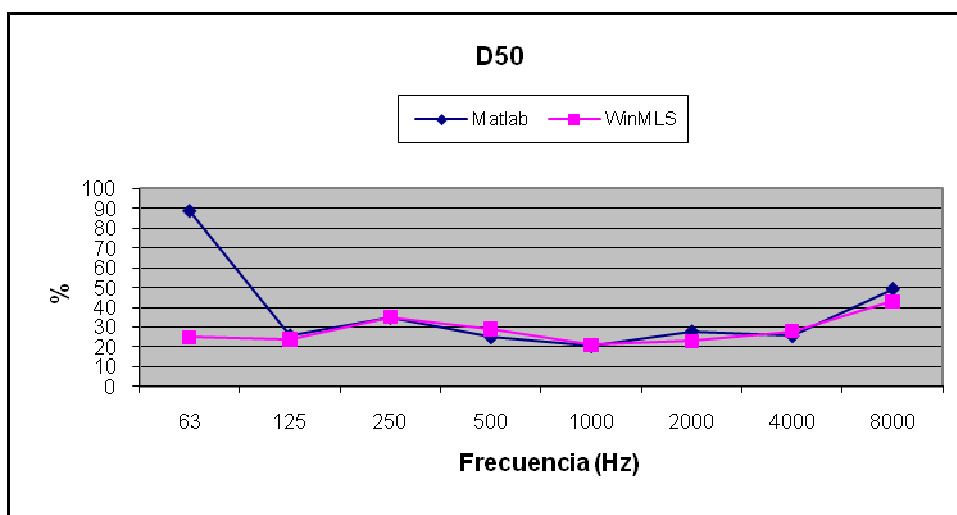


Figura 270. Comparativa D50

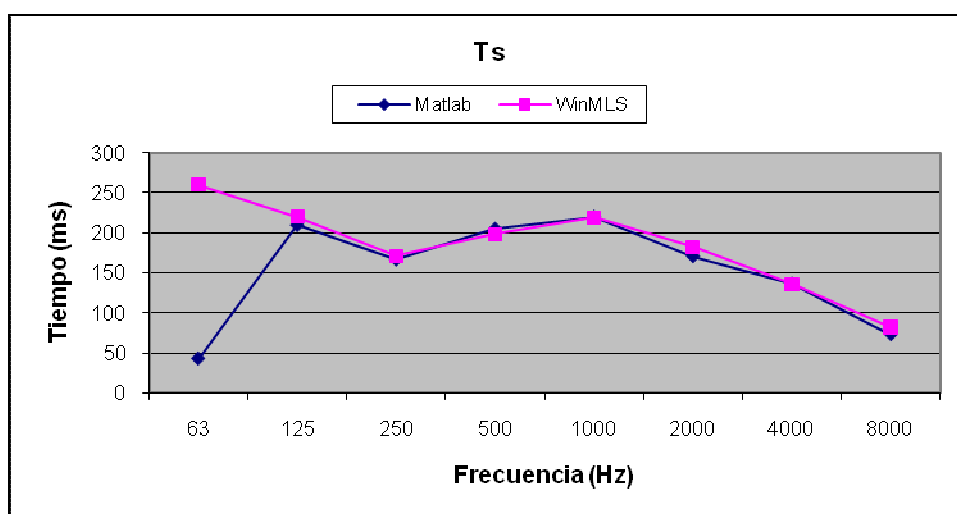


Figura 271. Comparativa Ts

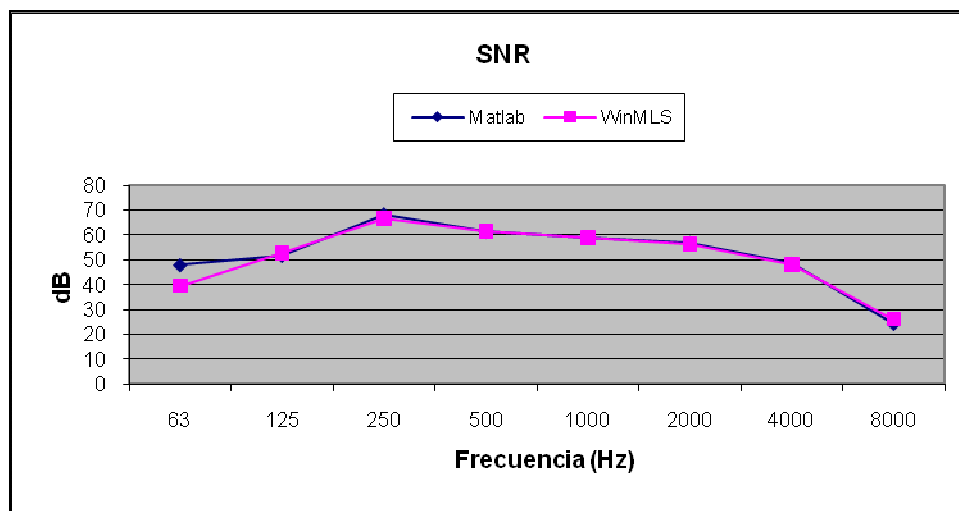


Figura 272. Comparativa SNR

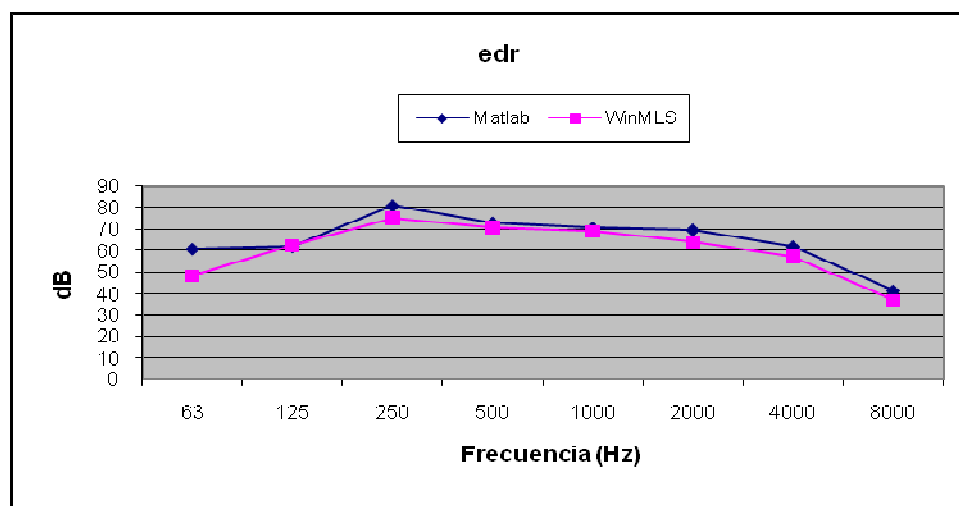


Figura 273. Comparativa edr

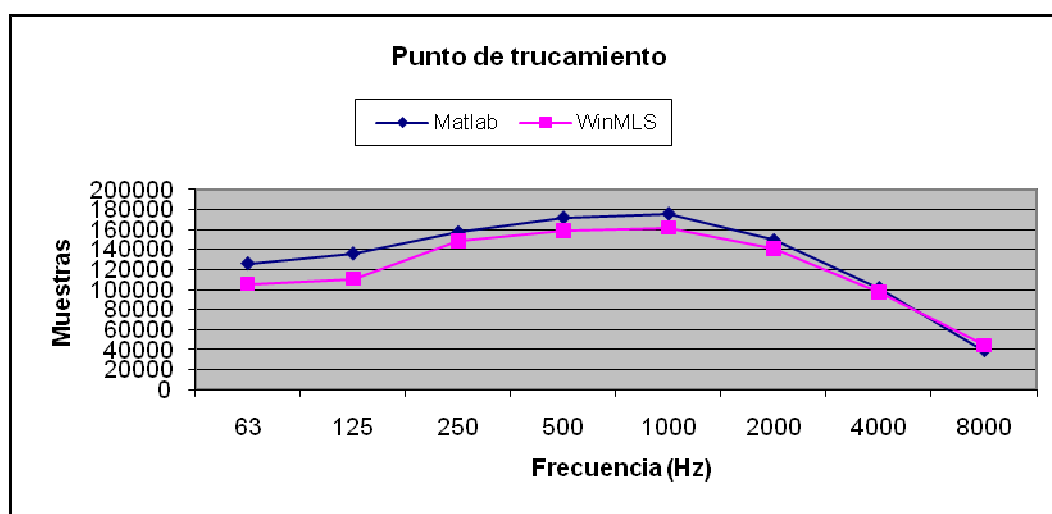


Figura 274. Comparativa punto de truncamiento

ANEXO E. Definición del JND y sus valores

Para varios estímulos sensoriales, el **jnd** ("just noticeable difference" o mínima diferencia apreciable) se define como la mínima diferencia que es apreciable entre el nivel de referencia de un estímulo y el mismo estímulo con otro nivel. En este caso lo aplicamos a parámetros acústicos derivados de respuestas impulsivas. De este modo, en acústica, se toma como jnd la mínima variación discernible en un parámetro acústico (TR, EDT, Ts, G,...).

A día de hoy estos valores de jnd están estandarizados para cada parámetro, éstos se presentan a continuación.

Parámetro	<i>EDT, T20, T30</i>	<i>Tc</i>	<i>C50, C80</i>	<i>D50</i>	<i>G</i>
jnd	5% s	10 ms	1 dB	5 %	1 dB

Tabla 7. Valor del jnd para los diferentes parámetros



“DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS DERIVADOS DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN ACÚSTICA DE SALAS”

Eider Román Eceiza

ÍNDICE

1) Introducción teórica

2) Normativas y documentos de referencia

3) Métodos

4) Proceso de truncamiento

5) Curva de decaimiento energético

- Energía de compensación

6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva

- Tiempos de reverberación

- Balance entre energía inicial y final

- Parámetros relacionados con la energía lateral inicial

- Parámetros binaurales

7) Punto de truncamiento, SNR, edr

8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS

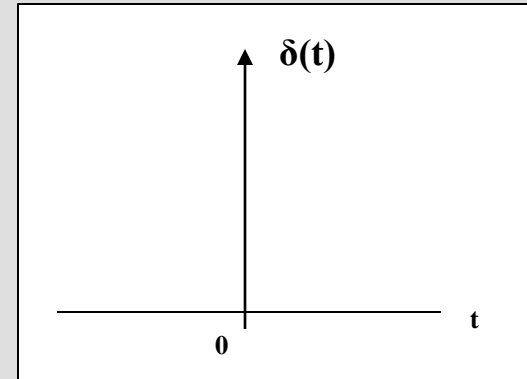
9) Interfaz gráfica

10) Mejoras y conclusiones

RESPUESTA IMPULSIVA

Sistema lineal e invariante temporal (LTI)

Señal de entrada \longrightarrow Función de impulso



SEÑALES DE EXCITACIÓN

Señales pseudoimpulsivas

Señales aleatorias

Señales pseudoaleatorias

Barridos frecuenciales



Sweeps lineales

Sweeps logarítmicos

Sweeps optimizados



Excitan la sala de acuerdo con el ruido de fondo presente, es decir, la frecuencia que se emite en cierto momento está compensando el ruido de fondo en esa misma frecuencia



La SNR es constante en toda la banda de análisis

ÍNDICE

1) Introducción teórica

2) Normativas y documentos de referencia

3) Métodos

4) Proceso de truncamiento

5) Curva de decaimiento energético

- Energía de compensación

6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva

- Tiempos de reverberación

- Balance entre energía inicial y final

- Parámetros relacionados con la energía lateral inicial

- Parámetros binaurales

7) Punto de truncamiento, SNR, edr

8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS

9) Interfaz gráfica

10) Mejoras y conclusiones

NORMA ISO 3382:2010

Método de la respuesta impulsiva integrada

Magnitudes acústicas

Enventanado temporal y filtrado de las respuestas

} ANEXO A

Magnitudes binaurales



ANEXO B

DOCUMENTO LUNDEBY-ACUSTICA 95

Proceso de truncamiento

Estimación de la pendiente de decaimiento y el ruido de fondo

Energía de compensación

Tiempos de reverberación			
EDT	Seis veces el tiempo que transcurre desde que la fuente deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB	S	Hacen referencia al grado de reverberación percibido en la sala y también corresponde con el grado de “viveza” de la sala
T ₂₀	Se evalúa el intervalo comprendido entre 5 dB y los 25 dB por debajo del nivel inicial y se extrapola a una caída de 60 dB	S	
T ₃₀	Se evalúa el intervalo comprendido entre 5 dB y los 35 dB por debajo del nivel Inicial y se extrapola a una caída de 60 dB	S	

Relación entre la energía inicial y la energía tardía			
C	$C_{t_c} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{t_c} p^2(t) dt}{\int_{t_c}^{\infty} p^2(t) dt} \right)$	dB	C₅₀ : Indicativo de la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado C₈₀ : Indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical
D₅₀	$D_{50} = \frac{\int_0^{0.050s} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$	%	Indicativo de la inteligibilidad de la palabra
T_s	$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$	ms	Indicativo de la distancia (en ms) desde el origen temporal t=0 hasta el centro de gravedad del área de la curva de decaimiento

Mediciones de la energía lateral inicial		
LF	$LF = \frac{\int_{0.005s}^{0.080s} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0.080s} p^2(t) dt}$	Permite cuantificar el grado de ASW (amplitud aparente de la fuente sonora)
LFC	$LFC = \frac{\int_{0.005s}^{0.080s} p_L(t) \cdot p(t) dt}{\int_0^{0.080s} p^2(t) dt}$	

Magnitudes binaurales		
IACC	$IACC_{t1,t2}(\tau) = \max IACF_{t1,t2}(\tau) ,$ $-1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}$ $IACF_{t1,t2}(\tau) = \frac{\int_{t1}^{t2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\left[\int_{t1}^{t2} p_l^2(t) dt \int_{t1}^{t2} p_r^2(t) dt \right]^{1/2}}$	Indicativo del grado de disimilitud entre las señales que llegan a ambos oídos

ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) **Métodos**
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

DIFERENCIAS ENTRE MÉTODOS

Método 1



**Se realiza el enventanado temporal
antes del filtrado por bandas de
octava**

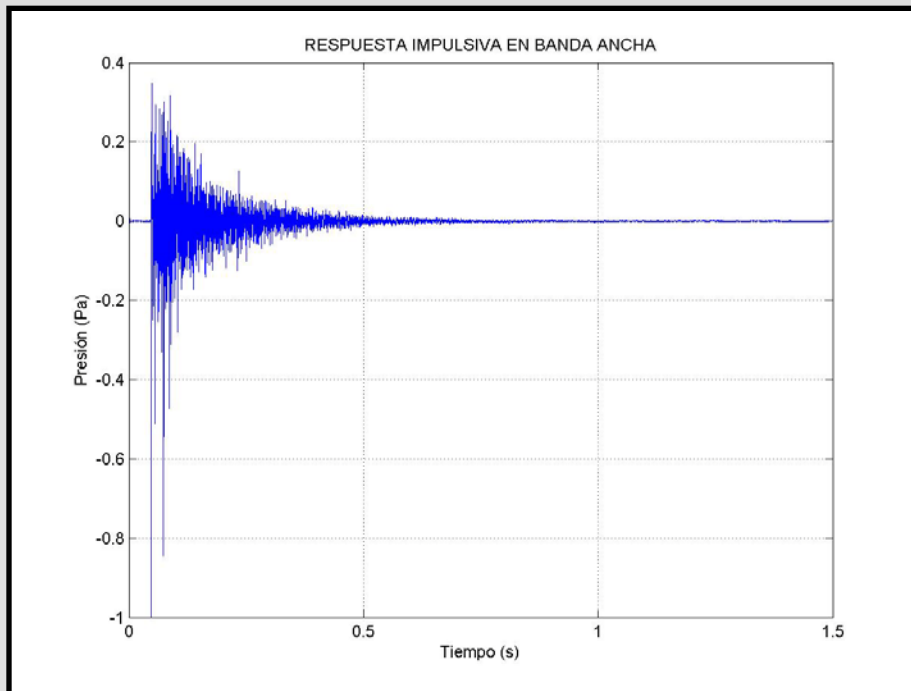
Método 2



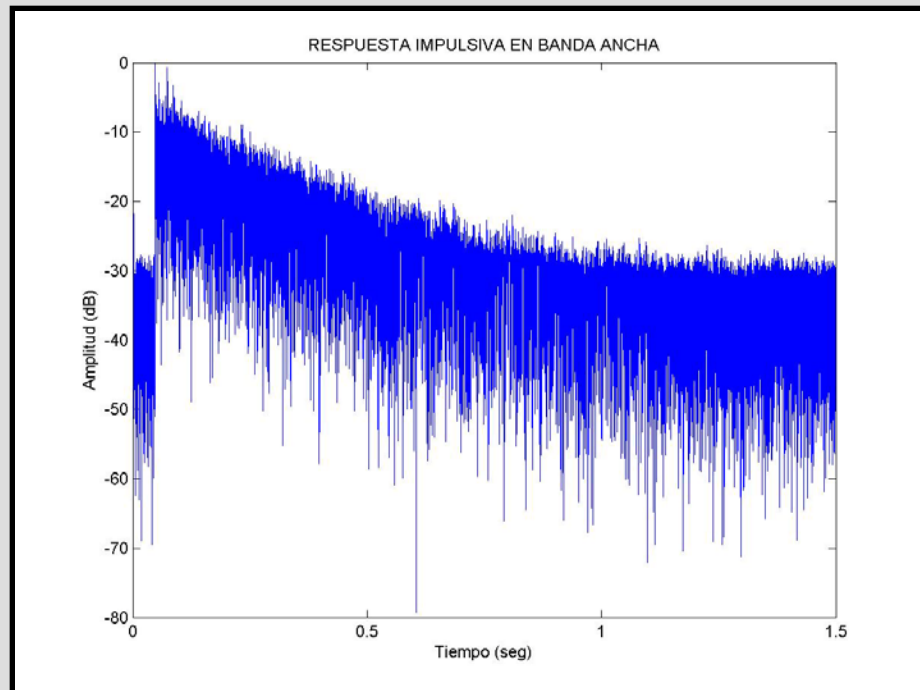
**Primero se realiza el filtrado por
bandas de octava y posteriormente
se definen los intervalos
temporales**

CAPTURA DE LA RESPUESTA IMPULSIVA

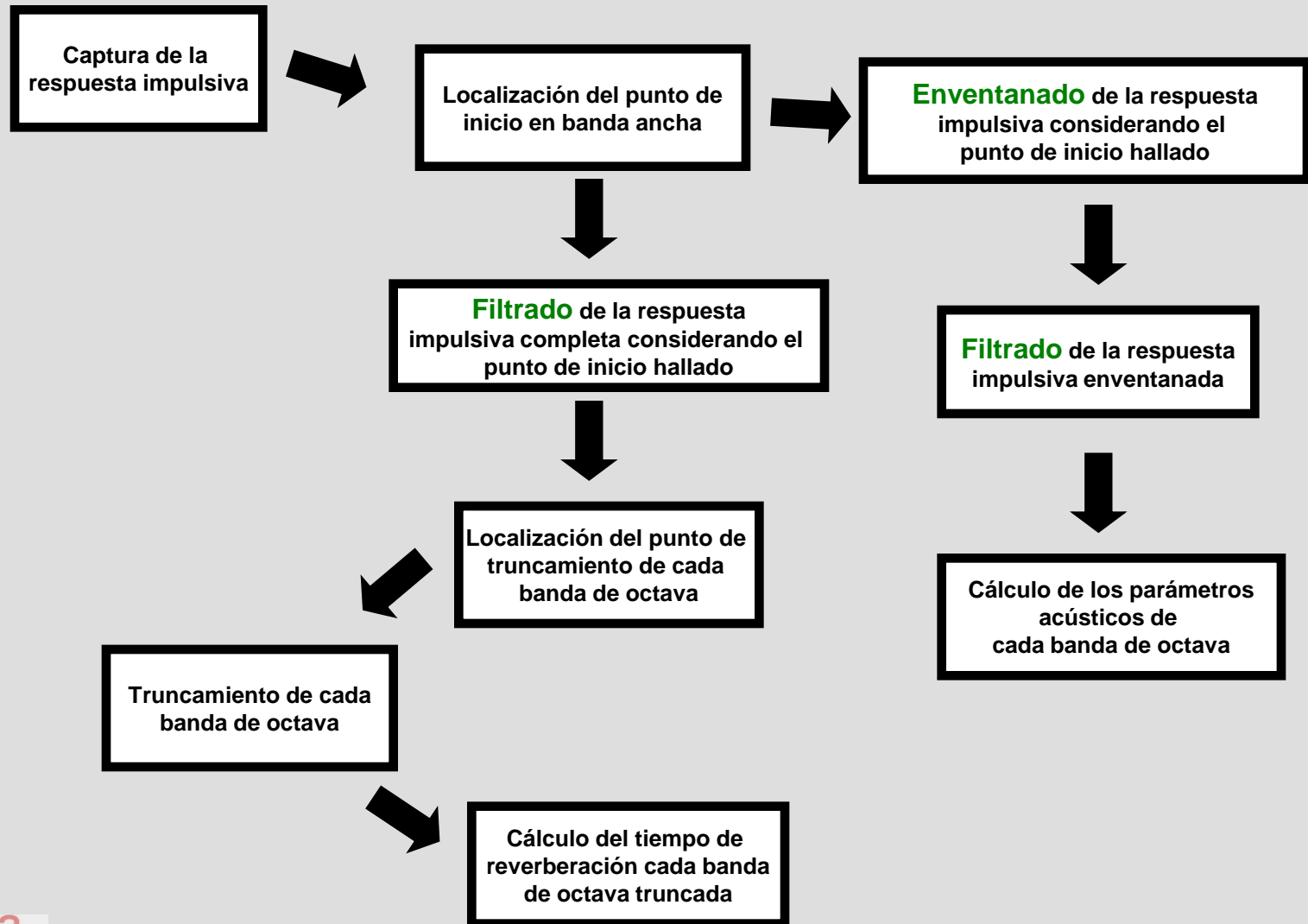
Escala lineal



Escala logarítmica



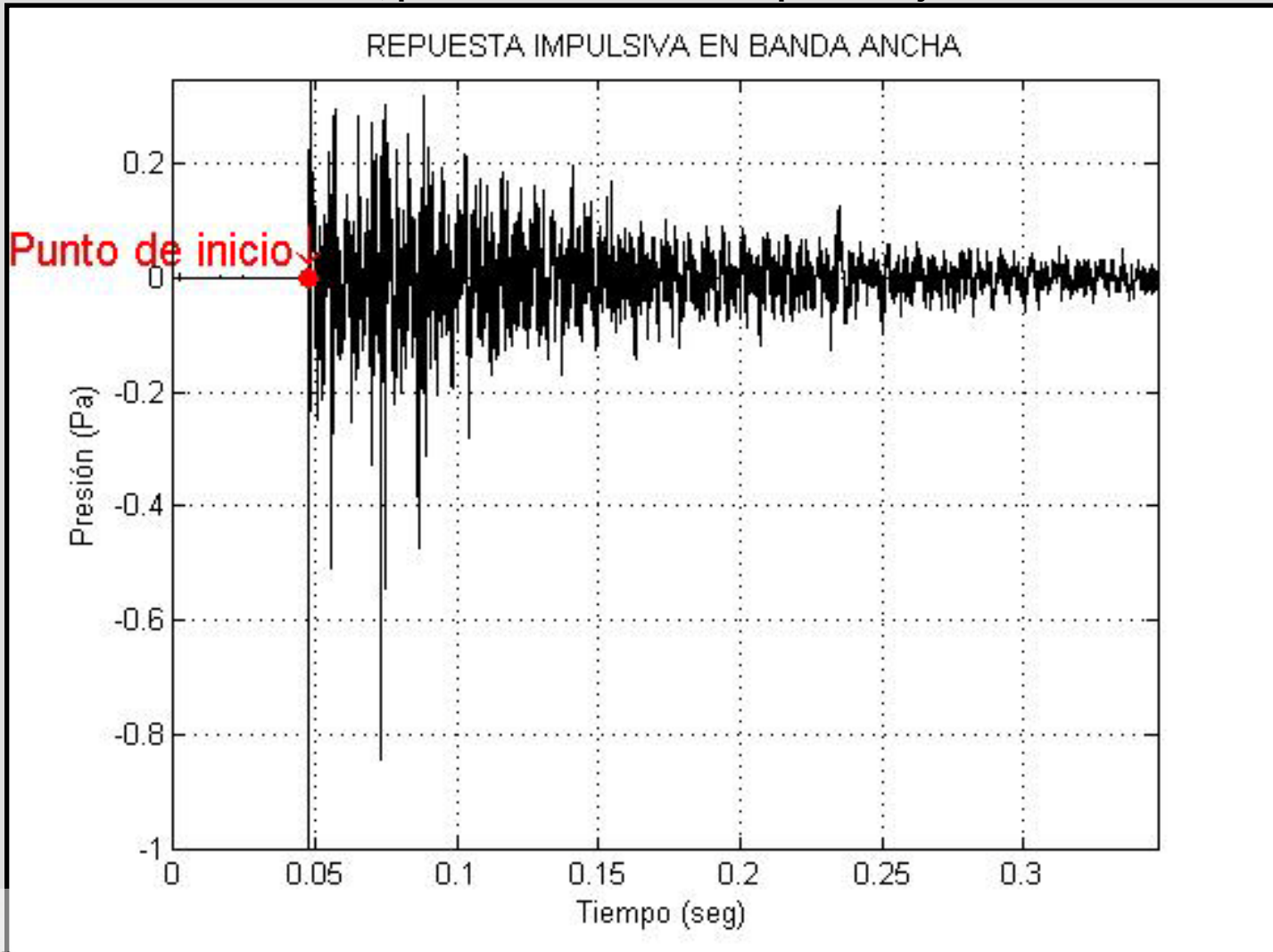
MÉTODO 1



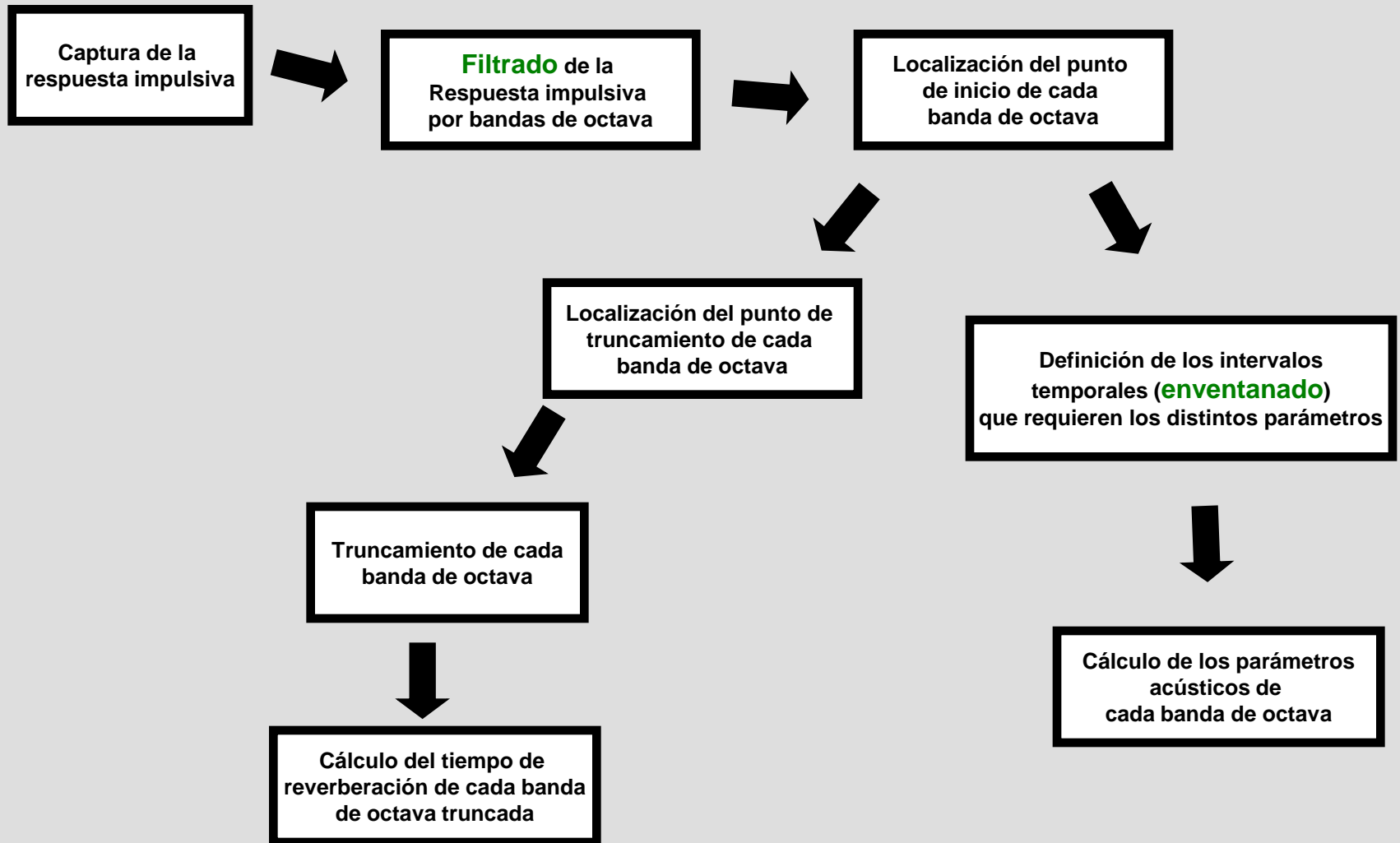
MÉTODO 1

Punto de inicio en banda ancha

Punto en el que la señal aumenta de forma significativa por encima del ruido de fondo, pero esté más de 20 dB por debajo del máximo



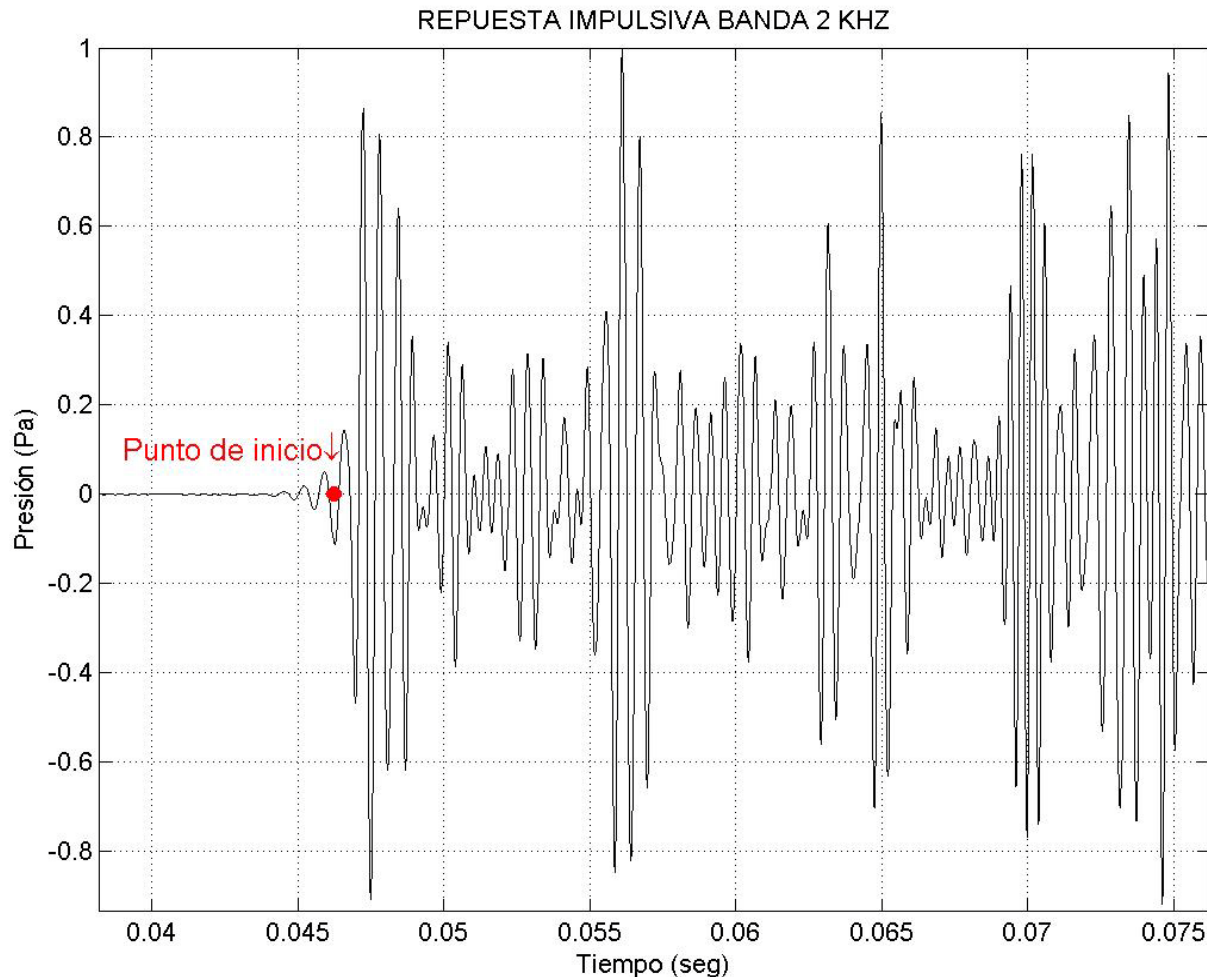
MÉTODO 2



MÉTODO 2

Punto de inicio para cada banda de octava

Punto en el que la señal aumenta de forma significativa por encima del ruido de fondo, pero esté más de 20 dB por debajo del máximo



ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) **Proceso de truncamiento**
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

PROCESO DE TRUNCAMIENTO

Paso 1 Promedio del cuadrado de la respuesta impulsiva en intervalos de tiempo local

Paso 2 Estimación del nivel de ruido de fondo utilizando la cola

Paso 3 Estimación de la pendiente de decaimiento desde 0 dB hasta el nivel del ruido

Paso 4 Encontrar el punto de cruce preliminar

Paso 5 Encontrar la longitud del nuevo intervalo de tiempo local

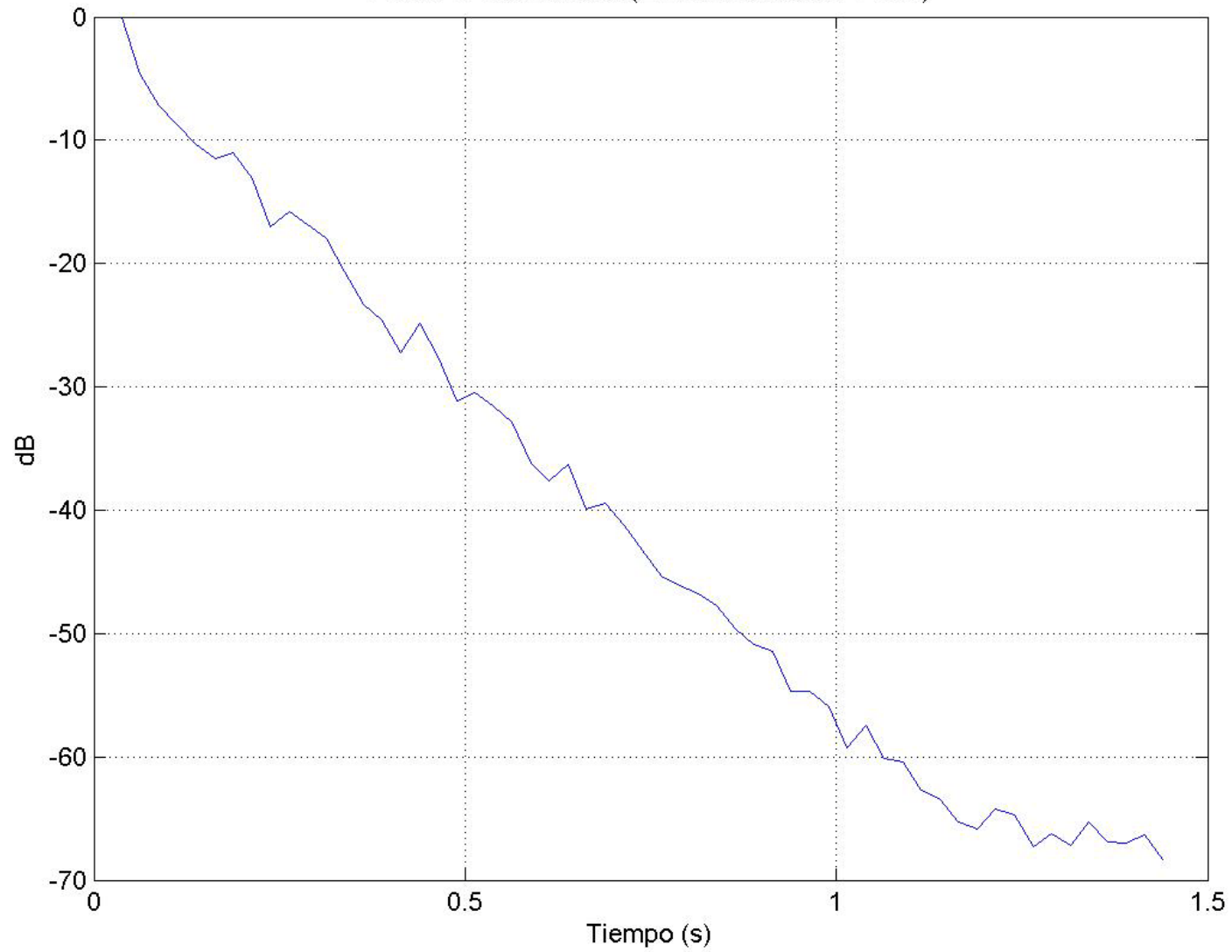
Paso 6 Promediado del cuadrado de la respuesta impulsiva en los nuevos intervalos de tiempo

Paso 7 Estimación del nivel del ruido de fondo

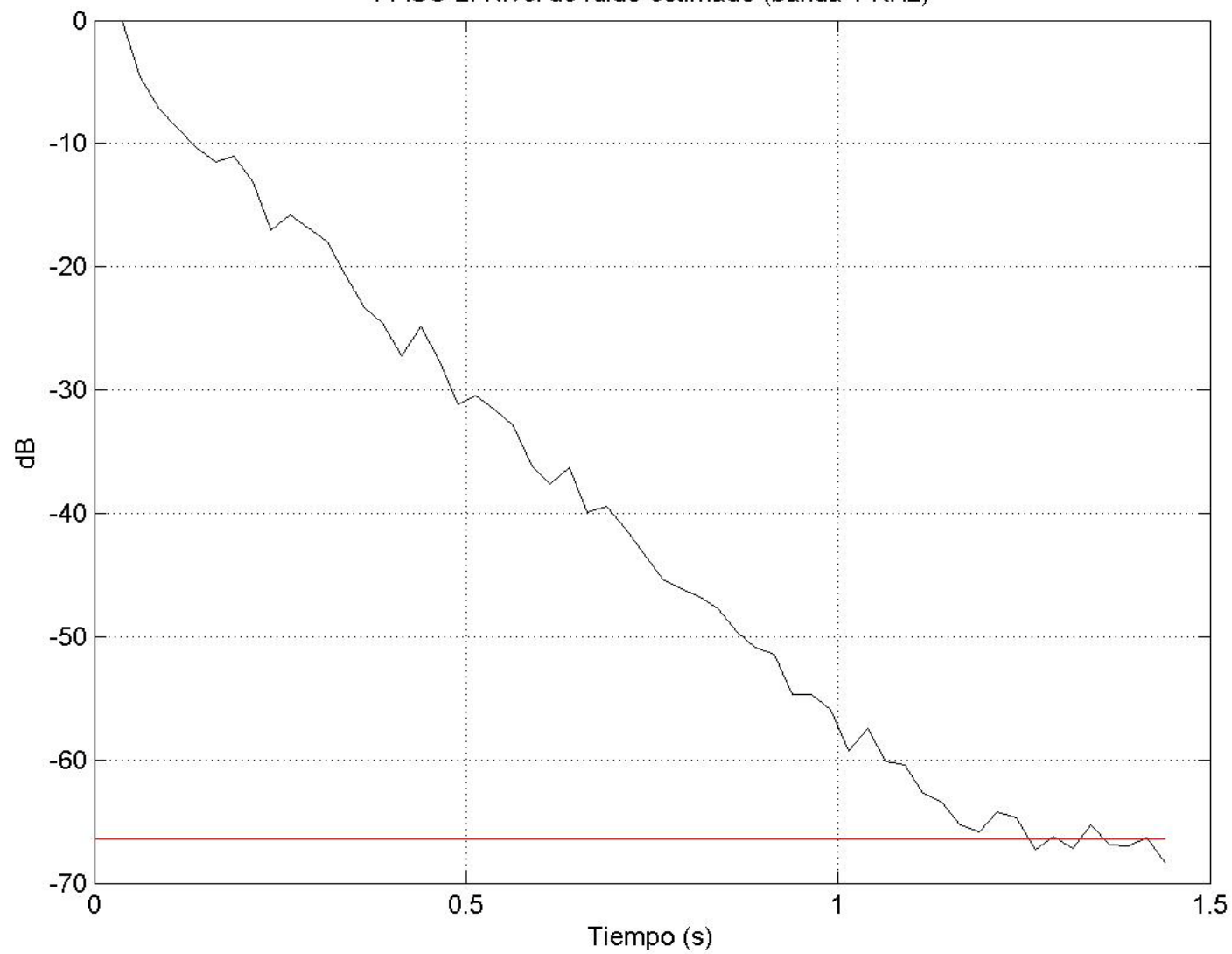
Paso 8 Estimación de la caída tardía de la pendiente

Paso 9 Punto de truncamiento

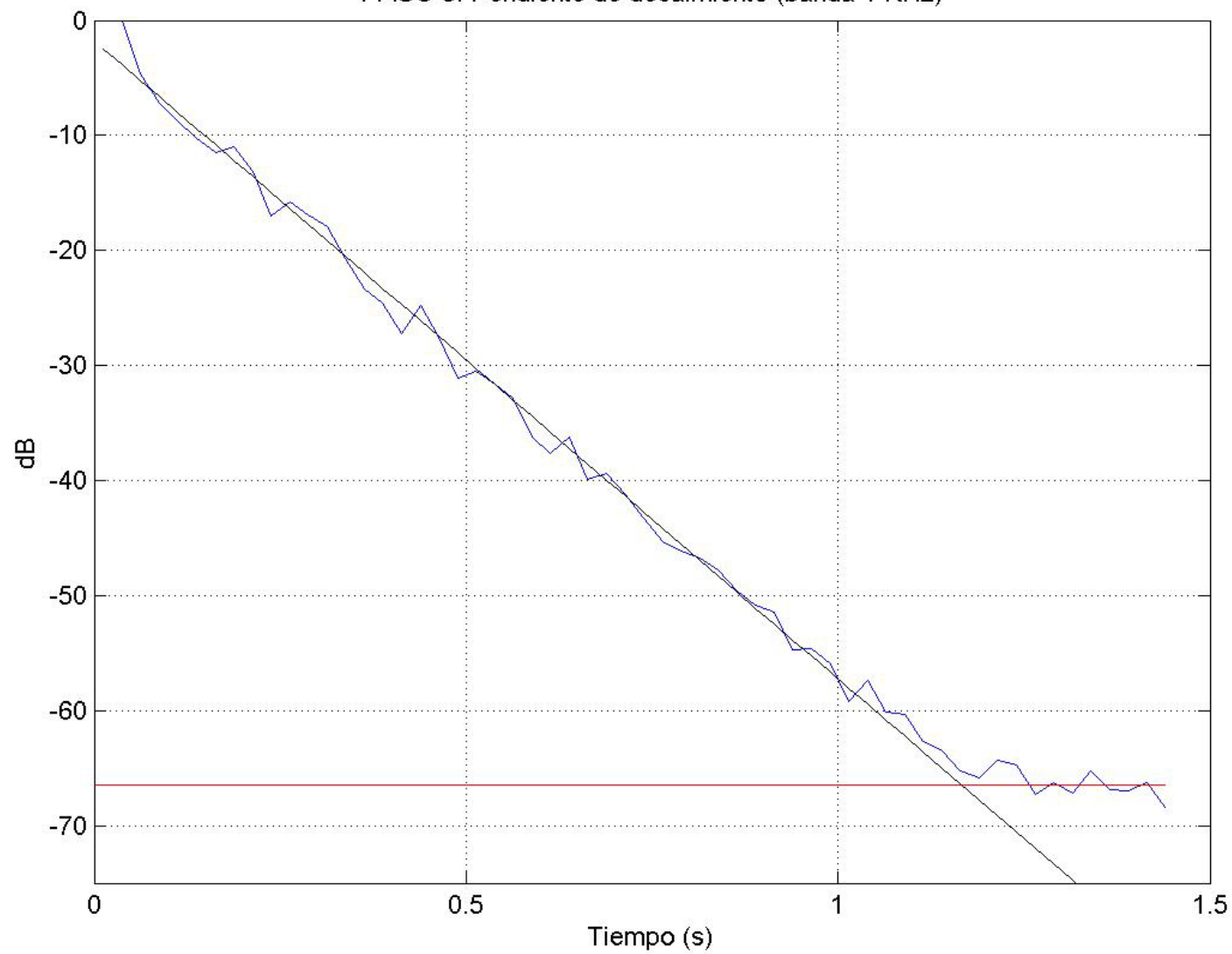
PASO 1: Promediado (Envolvente banda 1 KHz)



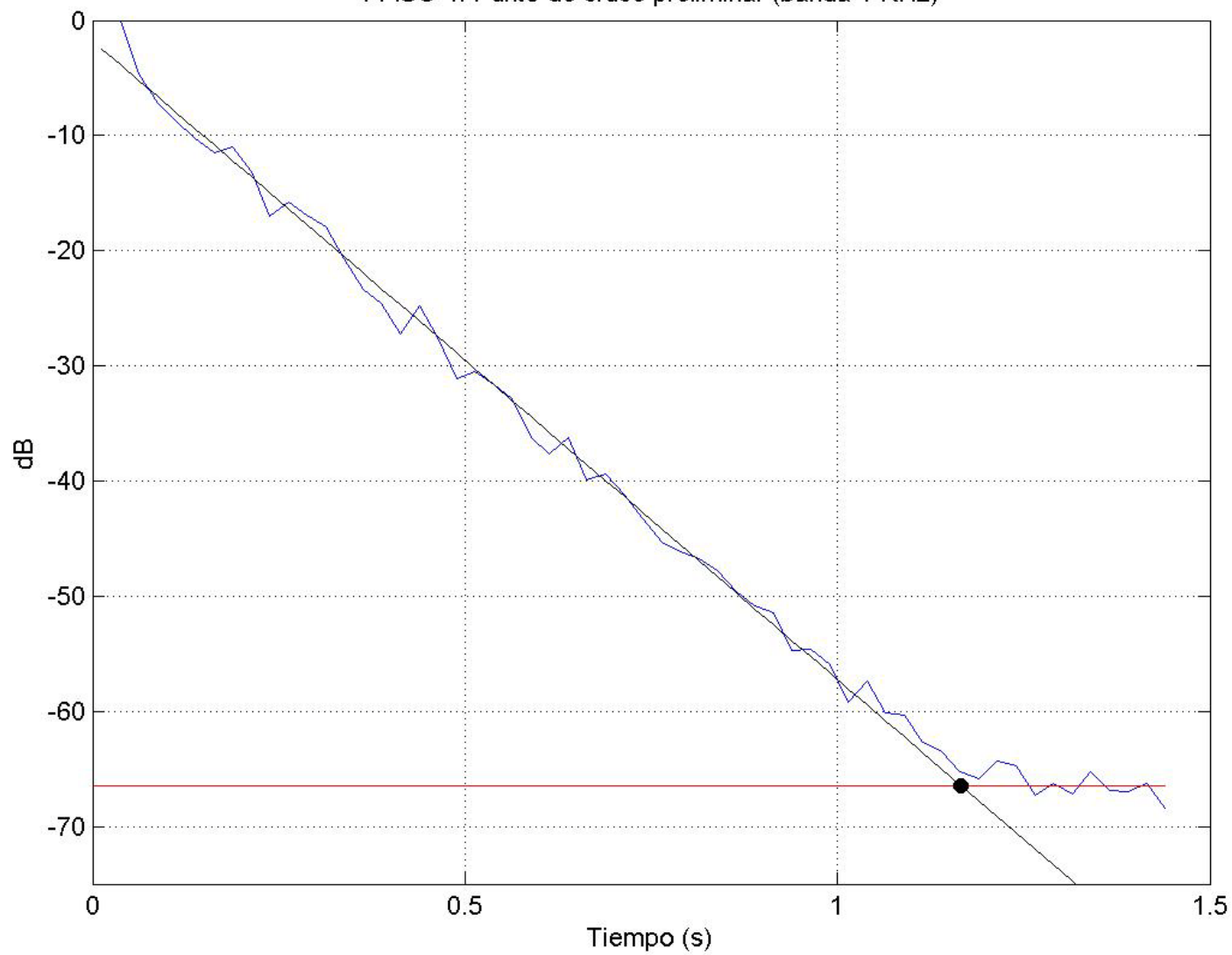
PASO 2: Nivel de ruido estimado (banda 1 KHz)



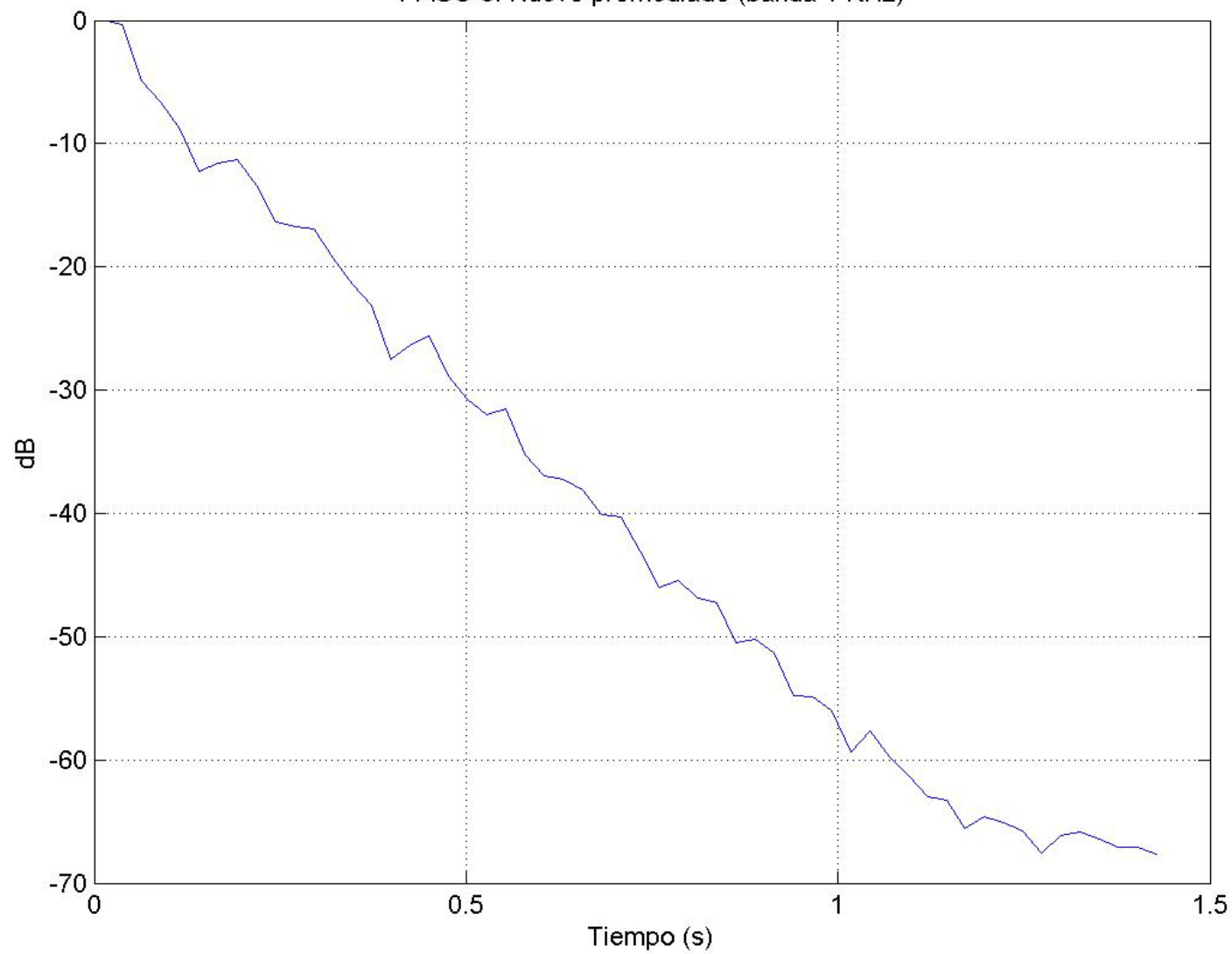
PASO 3: Pendiente de decaimiento (banda 1 KHz)



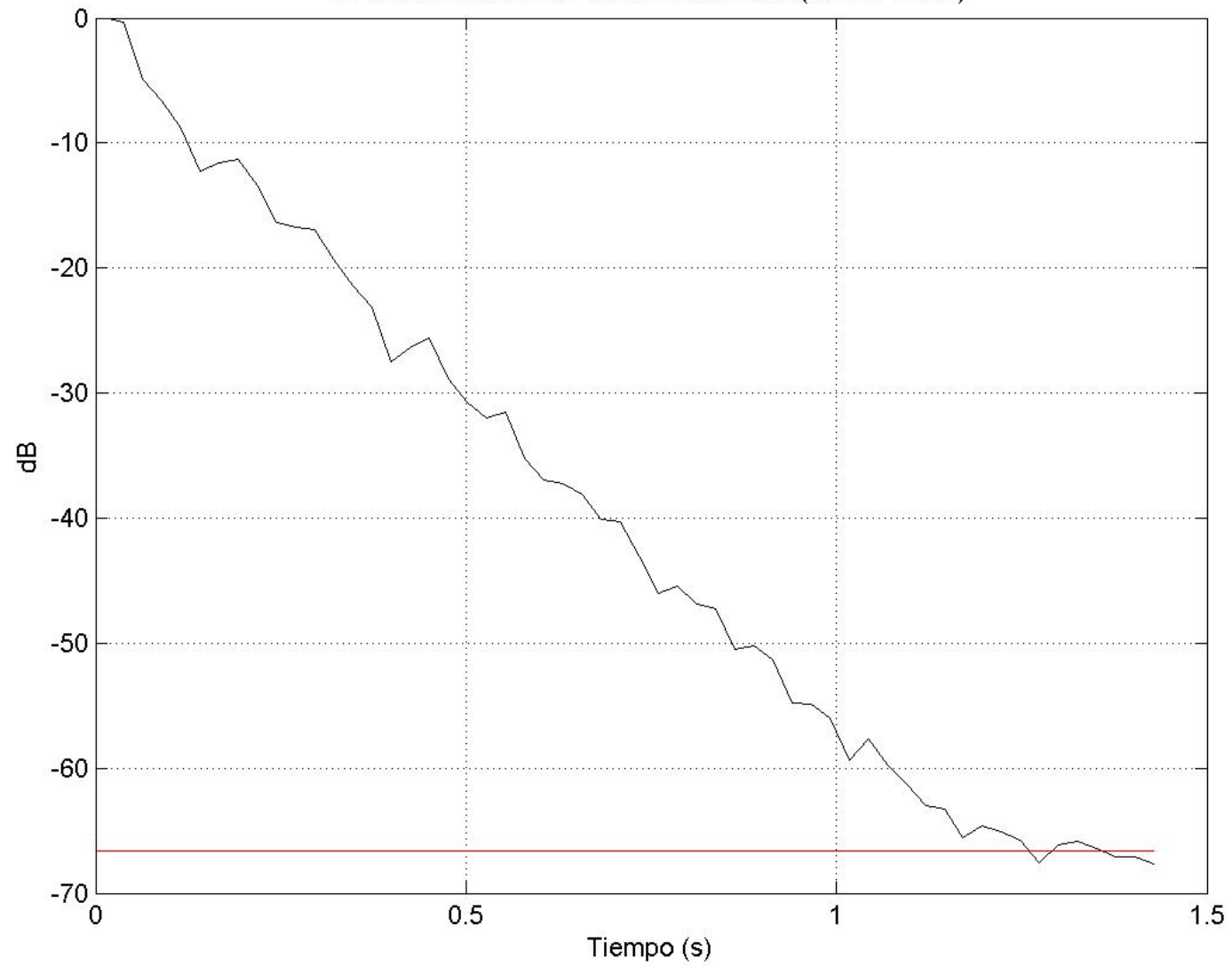
PASO 4: Punto de cruce preliminar (banda 1 KHz)



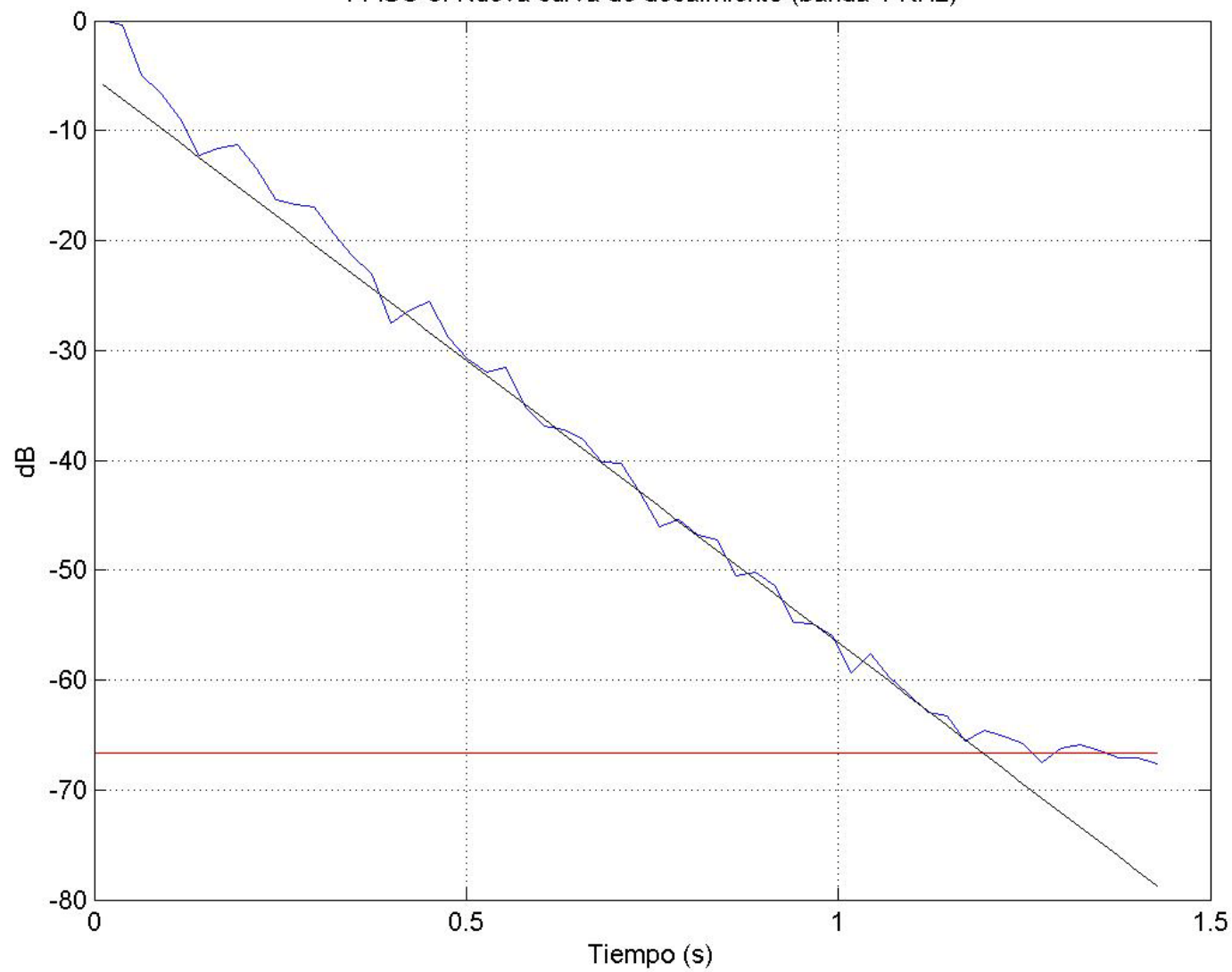
PASO 6: Nuevo promediado (banda 1 KHz)



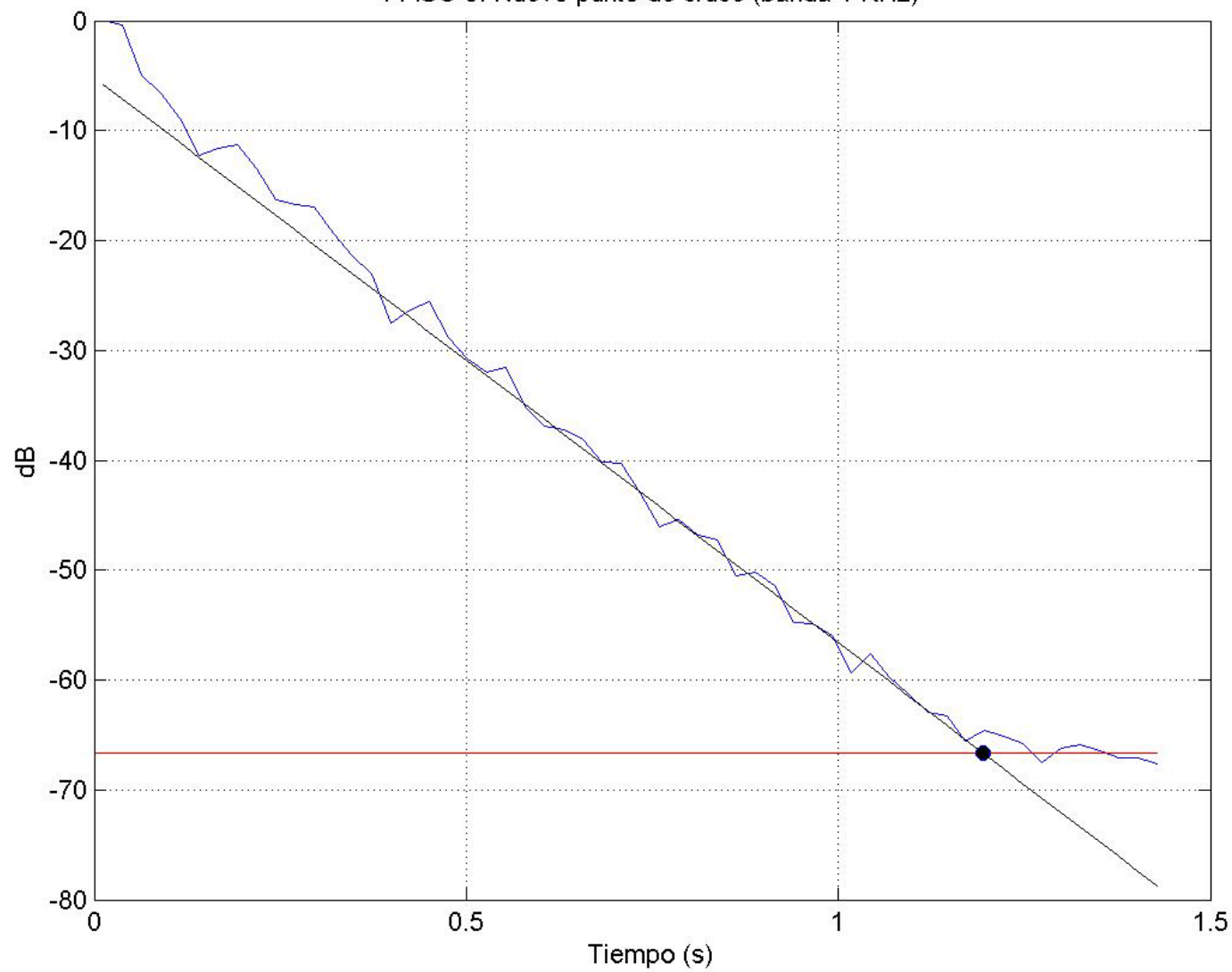
PASO 7: Nuevo nivel de ruido estimado (banda 1 KHz)

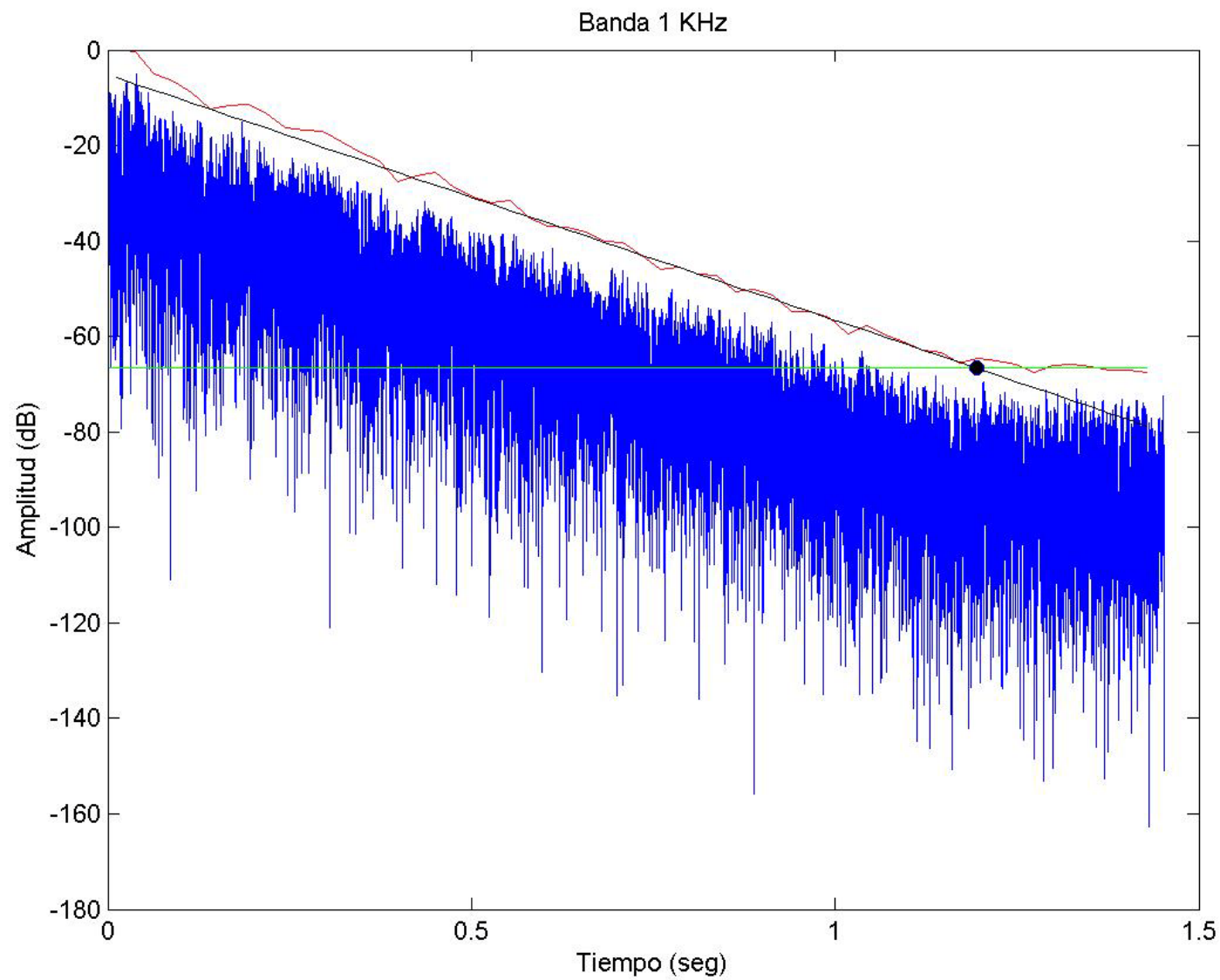


PASO 8: Nueva curva de decaimiento (banda 1 KHz)



PASO 9: Nuevo punto de cruce (banda 1 KHz)

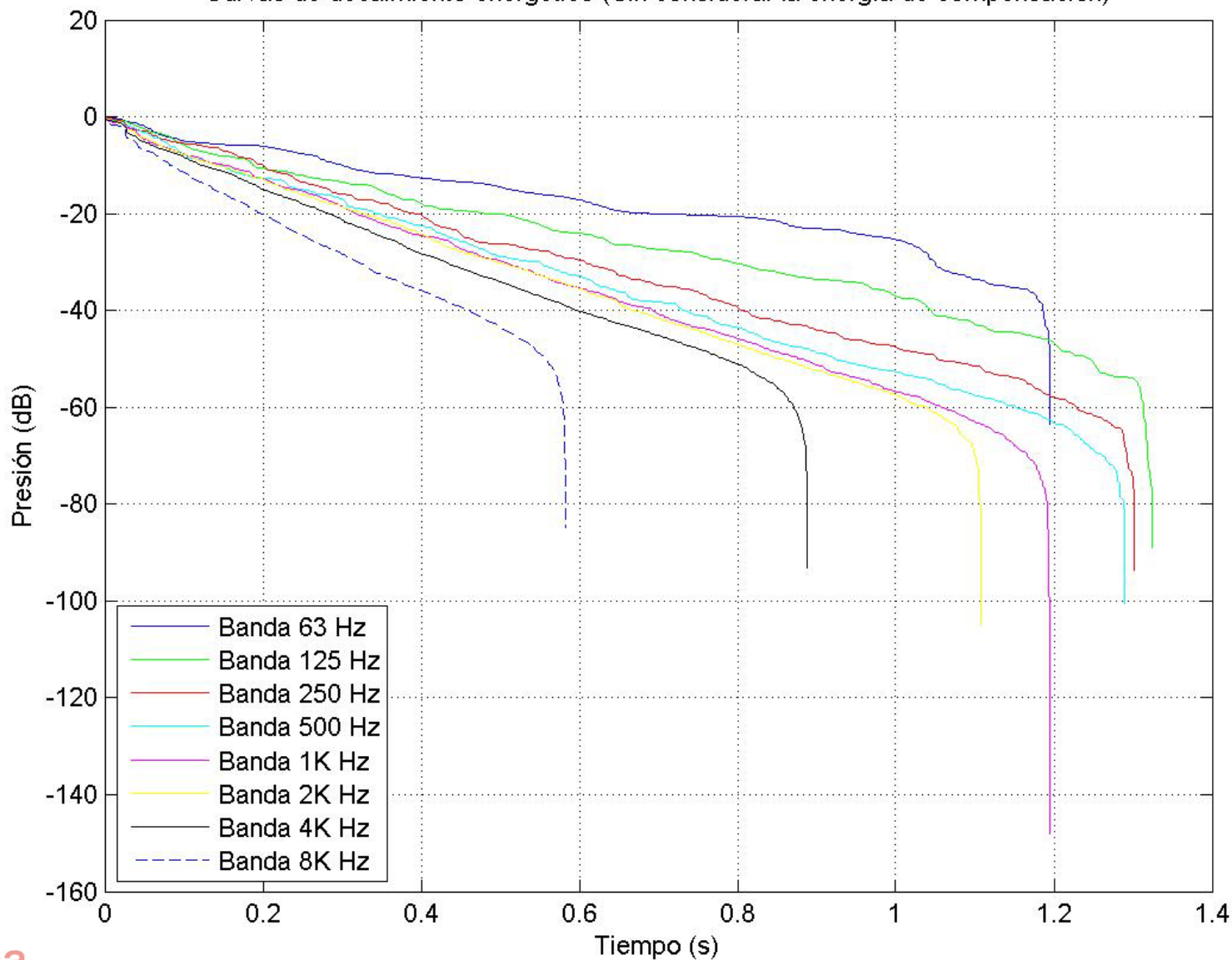




ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) **Curva de decaimiento energético**
 - Energía de compensación
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

Curvas de decaimiento energético (Sin considerar la energía de compensación)



ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - **Energía de compensación**
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

ENERGÍA DE COMPENSACIÓN

Considerar las energías equivalentes que hay en dos puntos del eje temporal



Punto cero y el punto donde la regresión lineal se encuentra con el nivel de ruido, t_1

La densidad de energía en el punto cero



Coeficiente B de la regresión lineal

La densidad de energía en t_1



Densidad de la energía del ruido, N

Expresión para el decaimiento exponencial



$$r(t) = B \cdot e^{At}$$

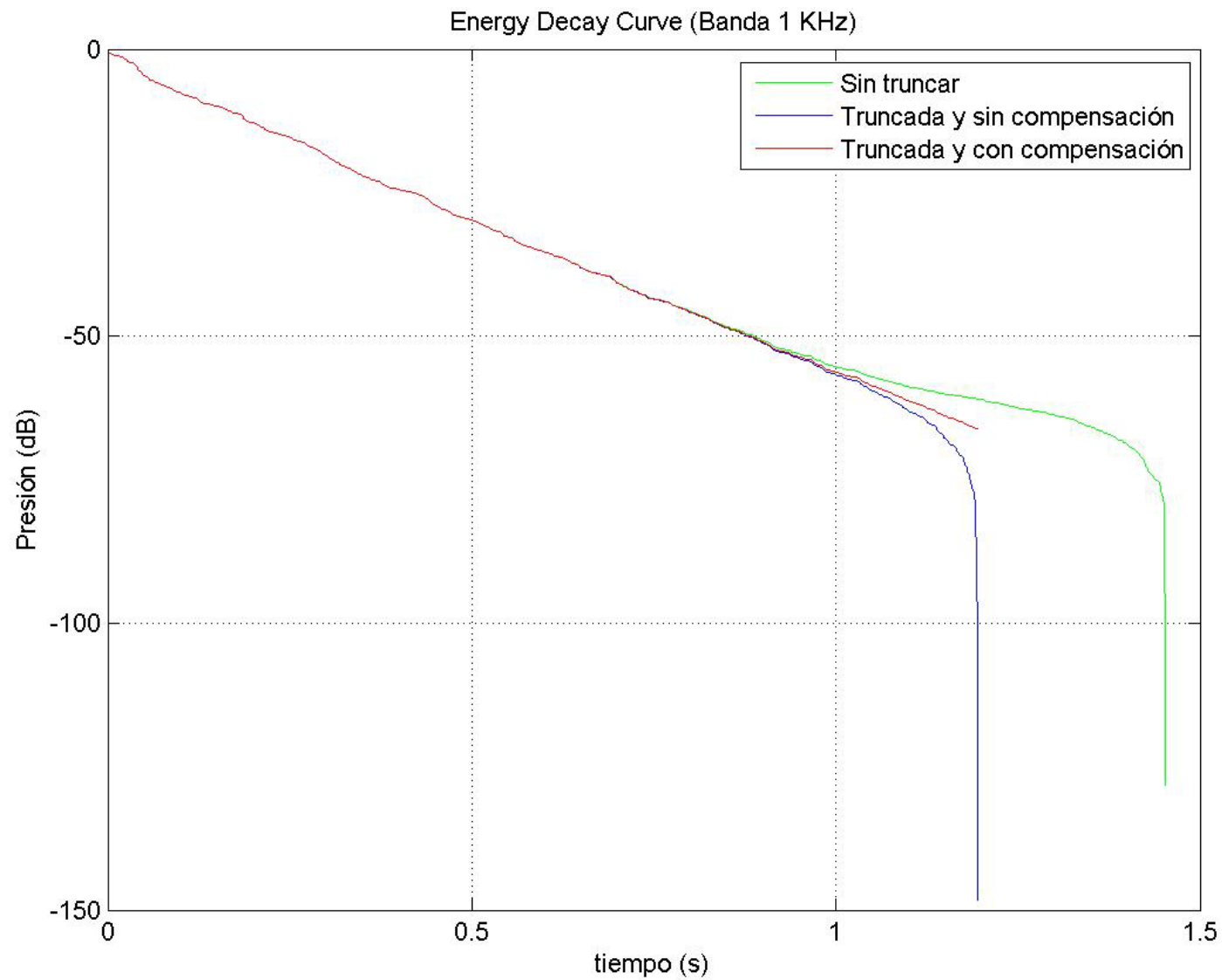
Energía de compensación total



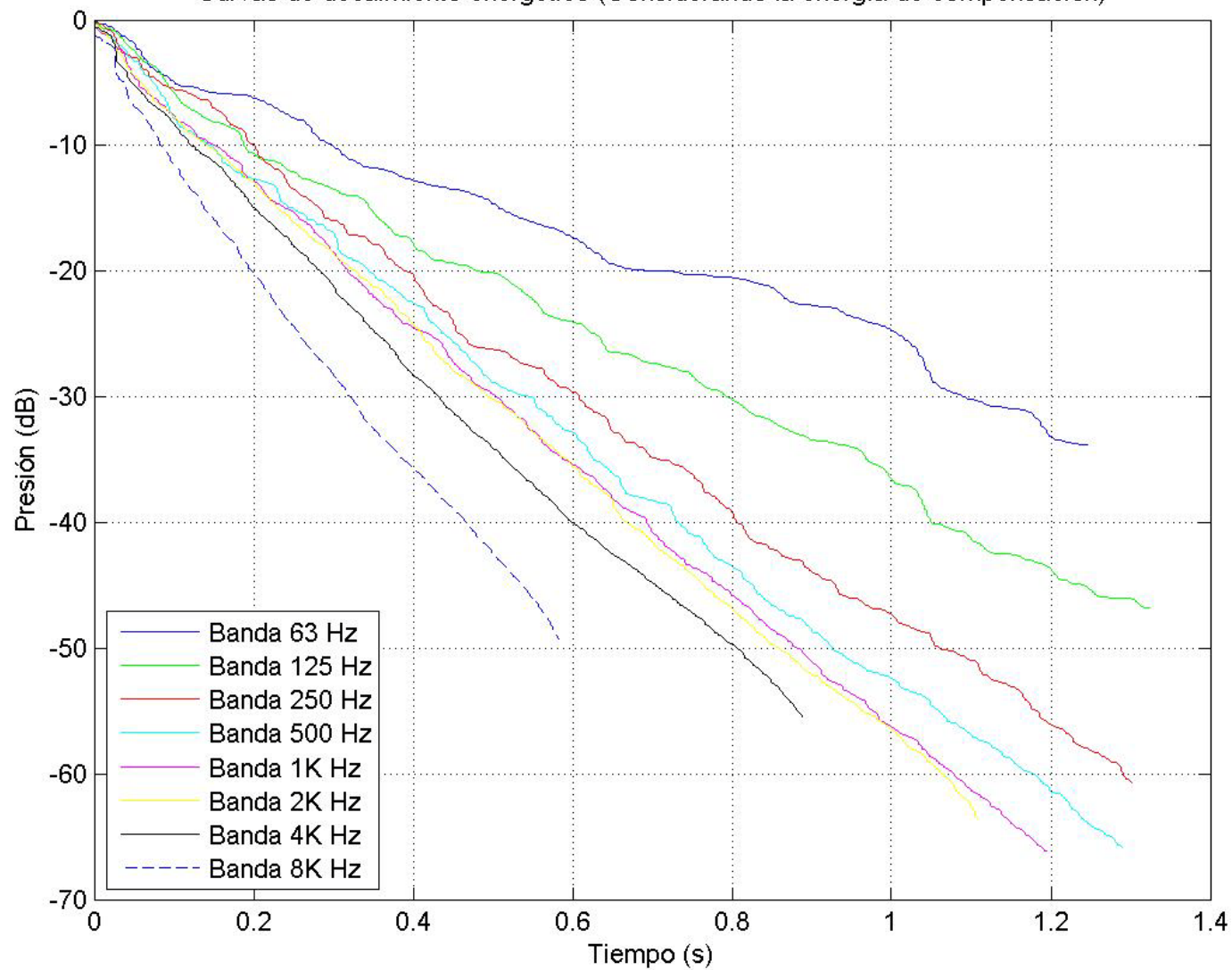
$$A = \frac{\ln\left(\frac{N}{B}\right)}{t_1}$$



$$E_{comp} = B \int_{t_1}^{\infty} e^{At} dt = -\frac{B}{A} e^{At_1}$$



Curvas de decaimiento energético (Considerando la energía de compensación)

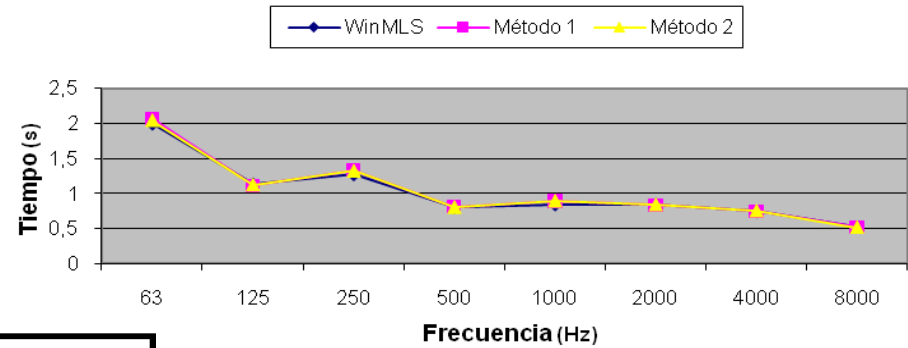


ÍNDICE

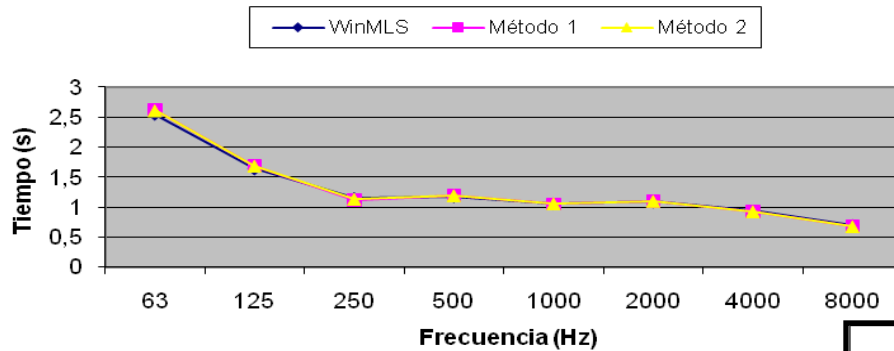
- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) **Parámetros derivados de la respuesta impulsiva**
 - **Tiempos de reverberación**
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

TIEMPOS DE REVERBERACIÓN

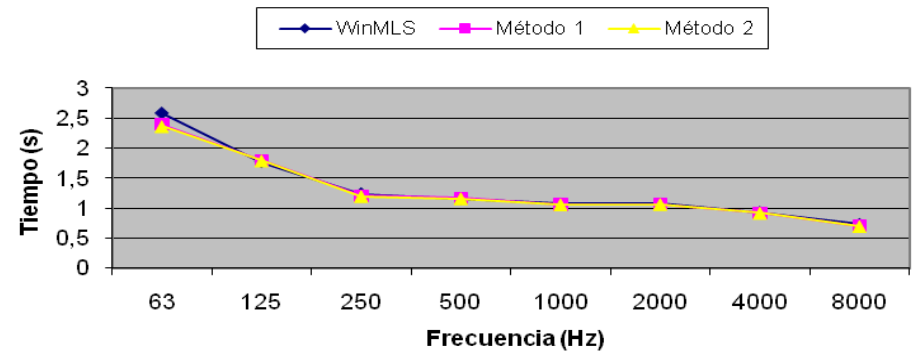
EDT



T20



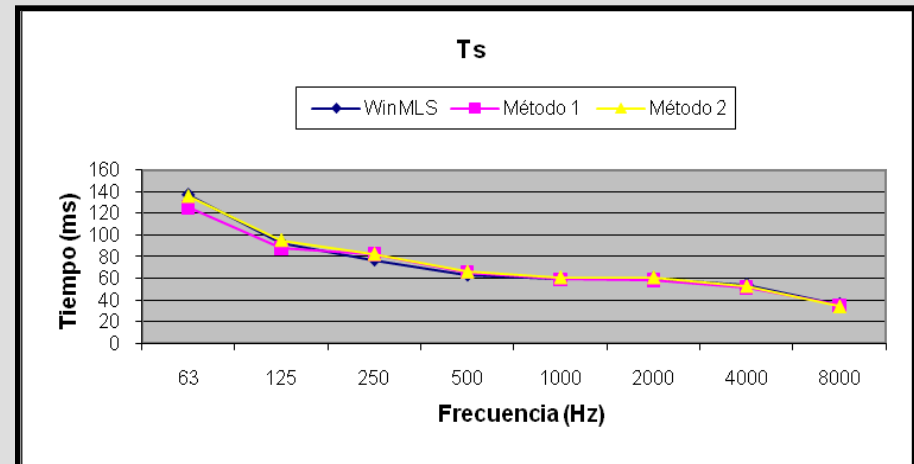
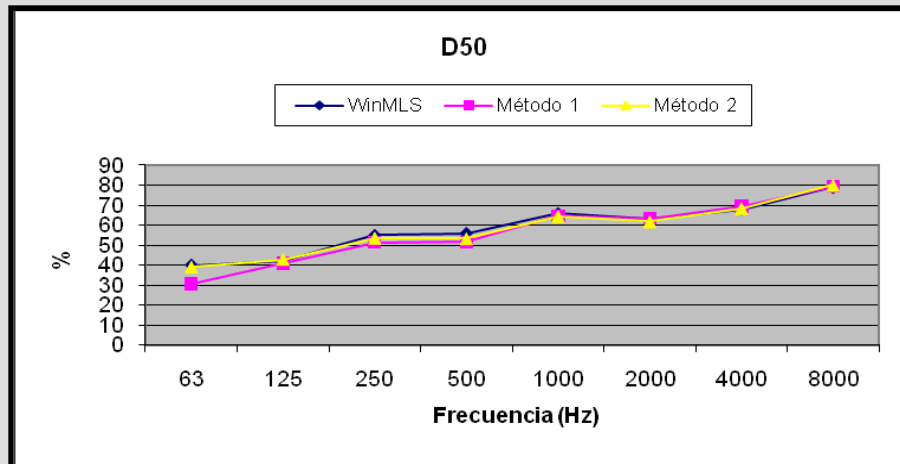
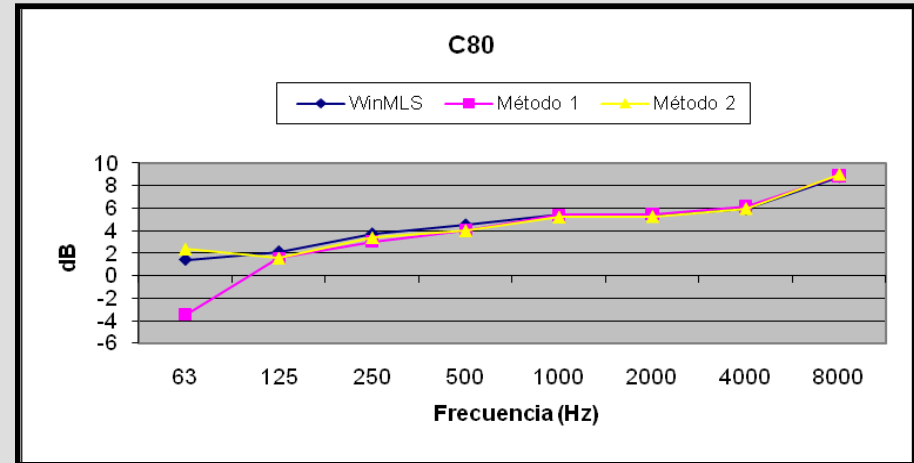
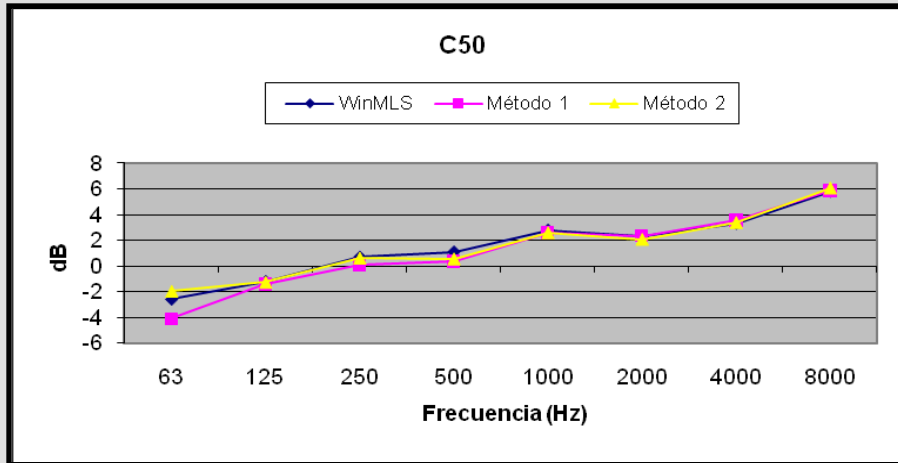
T30



ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) **Parámetros derivados de la respuesta impulsiva**
 - Tiempos de reverberación
 - **Balance entre energía inicial y final**
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

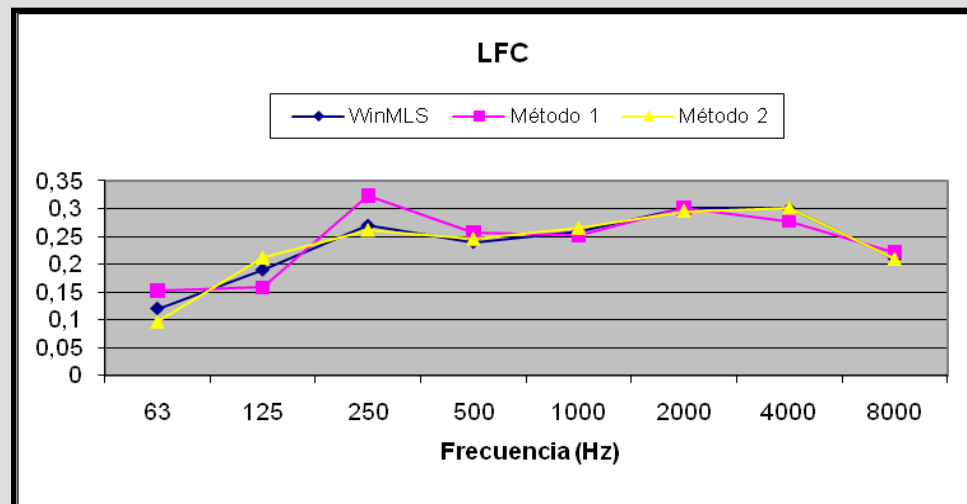
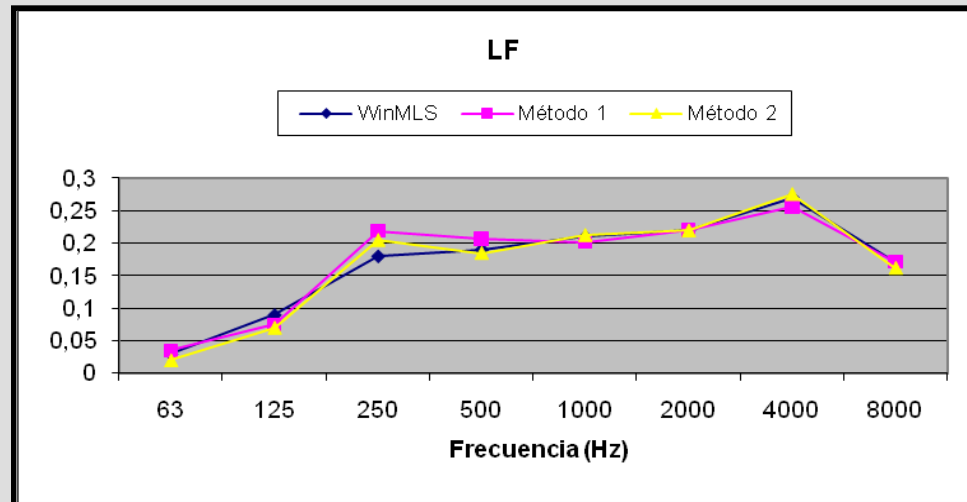
BALANCE ENTRE ENERGÍA INICIAL Y FINAL



ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) **Parámetros derivados de la respuesta impulsiva**
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - **Parámetros relacionados con la energía lateral inicial**
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA ENERGÍA LATERAL INICIAL

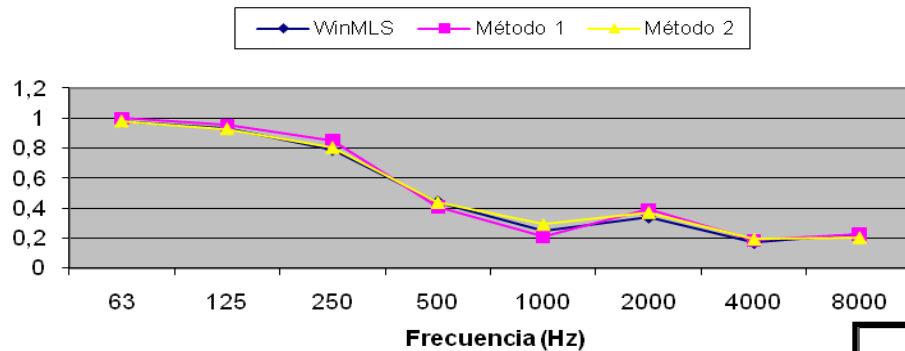


ÍNDICE

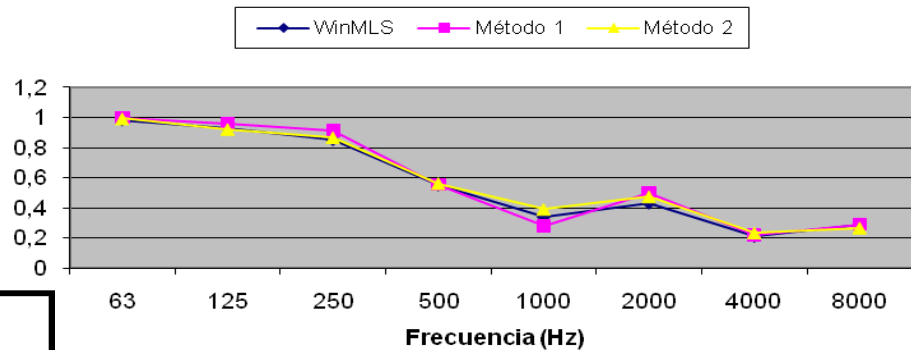
- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) **Parámetros derivados de la respuesta impulsiva**
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - **Parámetros binaurales**
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

PARÁMETROS BINAURALES

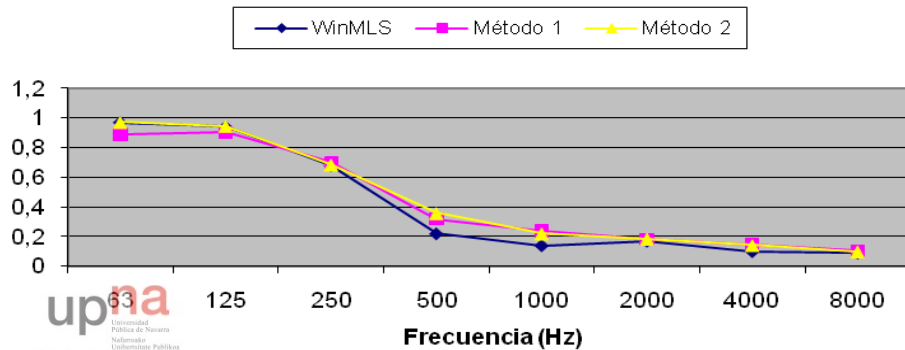
IACCA



IACCE



IACCL

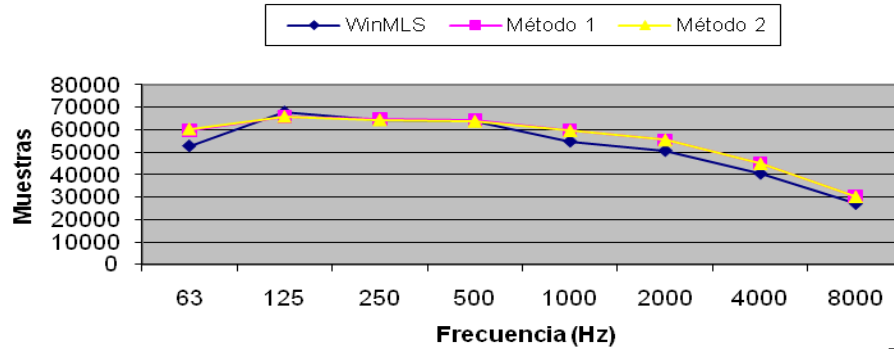


ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

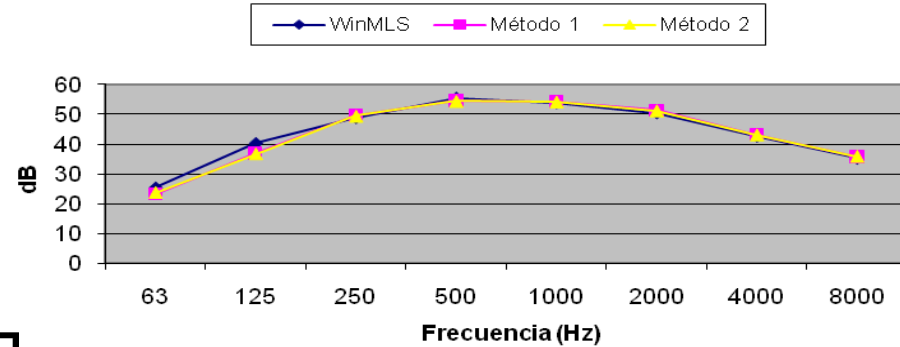
PUNTO DE TRUNCAMIENTO

Punto de truncamiento (Muestras)



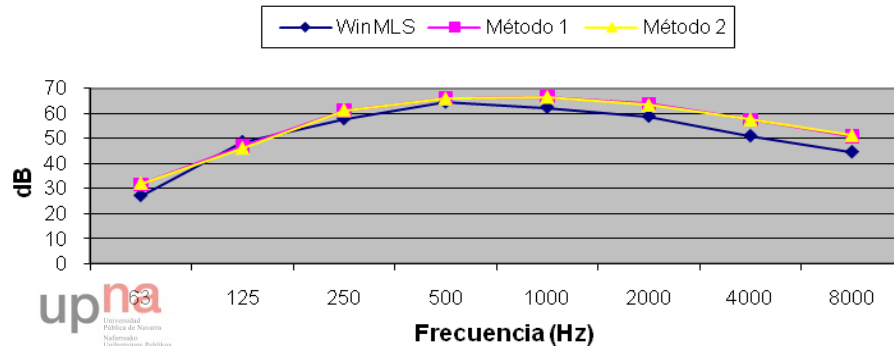
RELACIÓN SEÑAL RUIDO

SNR



RANGO DE CAÍDA EFICAZ

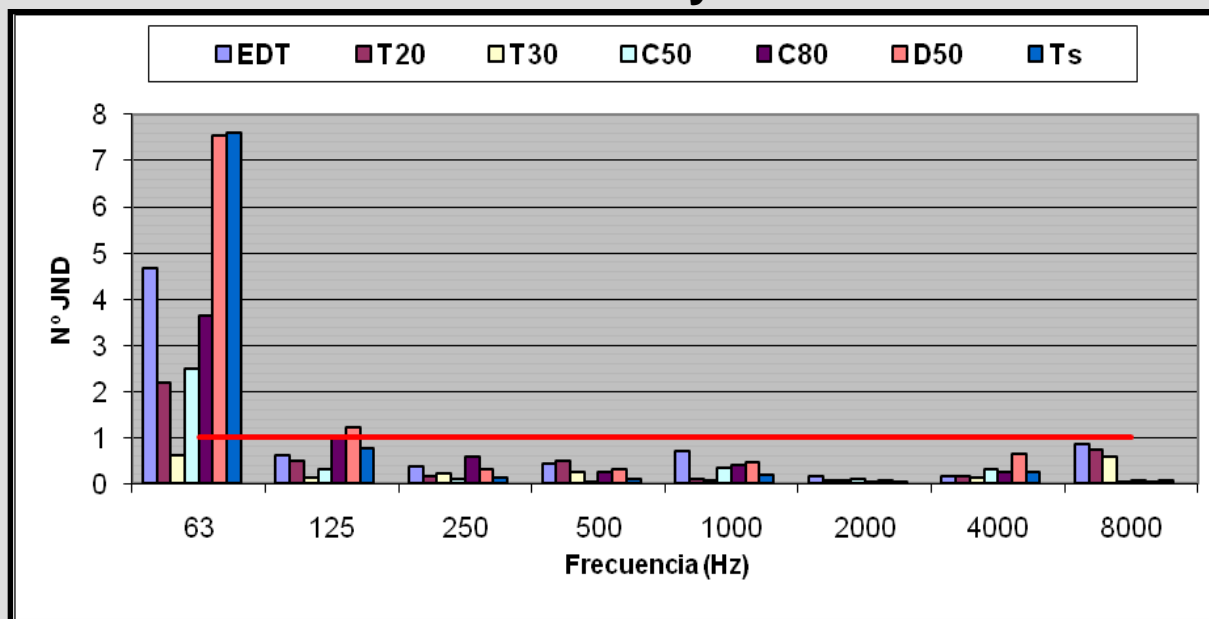
edr



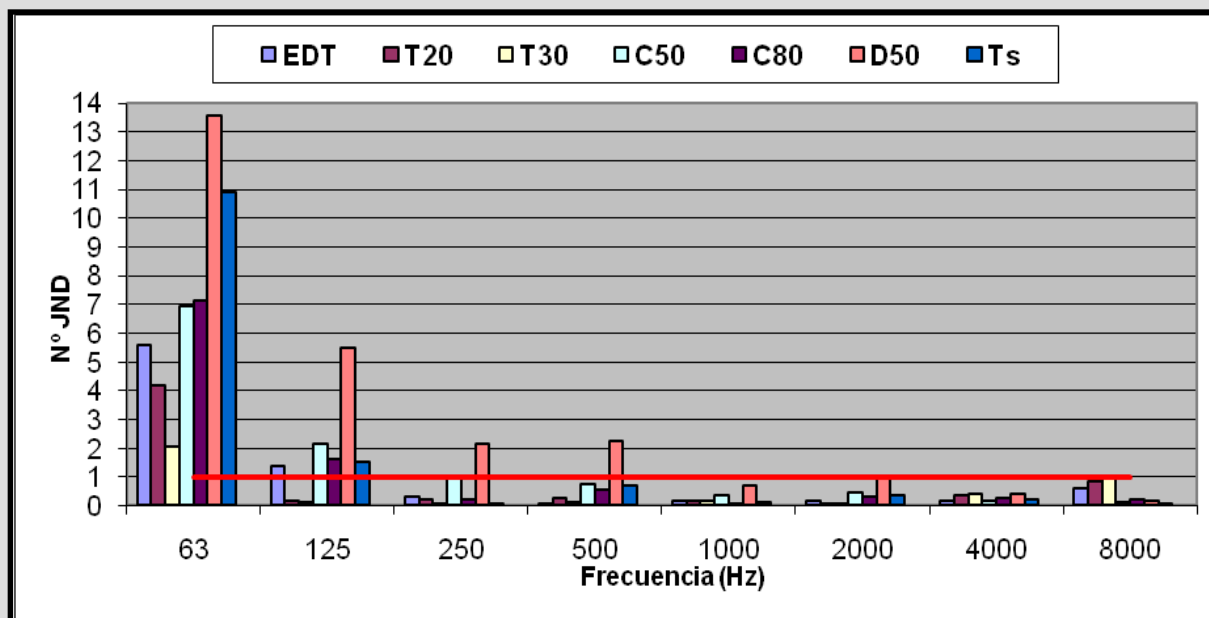
ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

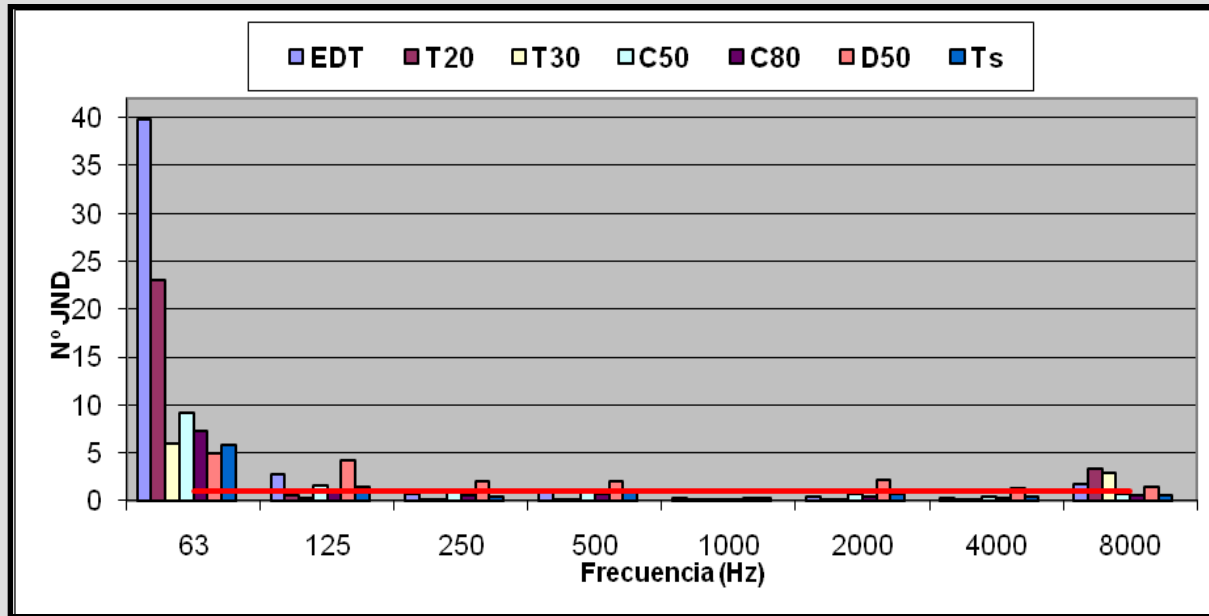
Teatro Gayarre



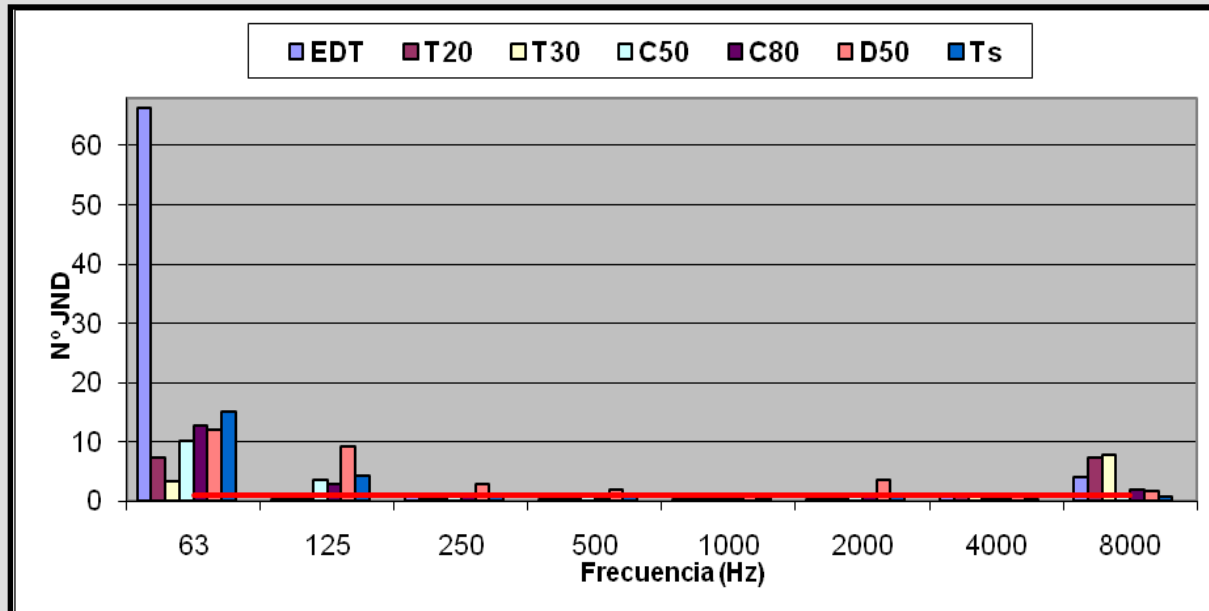
Teatro Bretón



Auditorio Kursaal



Auditorio Mozart



ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

INTERFAZ GRÁFICA



ÍNDICE

- 1) Introducción teórica
- 2) Normativas y documentos de referencia
- 3) Métodos
- 4) Proceso de truncamiento
- 5) Curva de decaimiento energético
 - Energía de compensación
- 6) Parámetros derivados de la respuesta impulsiva
 - Tiempos de reverberación
 - Balance entre energía inicial y final
 - Parámetros relacionados con la energía lateral inicial
 - Parámetros binaurales
- 7) Punto de truncamiento, SNR, edr
- 8) Comparativa del Método 1 con el WinMLS
- 9) Interfaz gráfica
- 10) Mejoras y conclusiones

MEJORAS

- **Análisis en 1/3 de octava**
- **Implementación del parámetro G**
- **Estudiar la posible influencia de las distintas variables haciéndolas modificables por el usuario**
- **Sincronización con el proyecto final de carrera correspondiente a la captura de la respuesta impulsiva**
- **Ejecutable para la interfaz gráfica**

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un software de análisis acústico, capaz de calcular, mediante dos métodos diferentes, los parámetros acústicos que derivan de la respuesta impulsiva.
- Las bandas más conflictivas son las bandas de baja frecuencia, debido al retardo significativo que introduce el filtro a bajas frecuencias y por la baja SNR habitualmente frecuente en este rango frecuencial.
- Para las caídas no homogéneas, la determinación de los tiempos de reverberación EDT, T20 y T30 es muy sensible a las diferentes variables presentes en el análisis, tales como la estimación del punto de truncamiento o el tamaño del intervalo de integración.
- Tras el análisis de los resultados, parece que *WinMLS* se basa en el *Método 2*. Sin embargo, la recomendación de la *ISO 3382:2010* nos hace pensar que el *Método 1* desarrollado ofrece resultados más coherentes.
- Se ha optimizado el análisis de truncamiento y compensación logrando unos rangos de caída efectiva (edr) superiores a los del software comercial, lo que permite medir parámetros en situaciones más desfavorables en cuanto a relación señal ruido.
- Comparando los resultados de los parámetros acústicos ofrecidos por el programa implementado con los obtenidos con el WinMLS, éstos no se desvían más que el rango subjetivamente perceptible (JND) en el rango de frecuencias habitual (125 - 4K Hz).
- Las mayores ventajas que presenta el programa desarrollado frente al programa comercial, son el mayor control sobre el algoritmo diseñado y su precio.